

## Отзыв

официального оппонента на диссертацию Герман Марины Александровны «Влияние термической и термоводородной обработок на структуру и механические свойства заготовок из  $(\alpha+\beta)$ -титановых сплавов, полученных по аддитивным технологиям», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук специальности 05.16.01. «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

### Актуальность.

Разработка новых и совершенствование существующих технологий получения полуфабрикатов и деталей, обеспечивающих повышение их эксплуатационных свойств, остается одной из основных задач современной техники. Одним из наиболее перспективных и быстро развивающихся направлений изготовления деталей на протяжении последних десятилетий являются аддитивные технологии (АТ). В России разработке и применению этих технологий в промышленности уделяется большое внимание, однако ряд проблем, связанных с большим отставанием отечественной промышленности в этой области, препятствует широкому внедрению указанных технологий. Одной из таких проблем является недостаточное количество работ, посвященных исследованию процессов формирования структуры для обеспечения необходимого комплекса свойств изделий, полученных 3D-печатью. Одним из основных технологических процессов, влияющих на строукообразование, является термическая обработка. Следует отметить, что для деталей, получаемых АТ, как справедливо отмечено автором, в настоящее время применяется только отжиг. Исходя из вышесказанного, становится совершенно очевидным, что в работе Герман Марины Александровны рассматриваются актуальные вопросы современного материаловедения, связанные с решением проблем промышленного использованием аддитивных технологий.

### Общая характеристика работы.

Одним из путей решения задачи, связанной с расширением применения АТ для заготовок из титановых сплавов является использование термоводородной обработки и разработка режимов ее проведения, обеспечивающих формирование заданного структурно состояния и свойств деталей как в литом, так и в деформированном состоянии. В диссертационной работе Герман М.А. на выполнен анализ современной научно-технической литературы, в котором рассмотрены такие вопросы как состояние аддитивного производства (АП) в России и перспективы его развития и различные методы 3D-печати, их преимущества и недостатки, а

также показана возможность управления структурообразованием титановых сплавов путем проведения термоводородной обработки. На основе выполненного анализа сформулирована цель и задачи диссертационной работы. В работе подробно рассмотрено влияние метода получения (селективное лазерное сплавление и прямое лазерное нанесение металла) и последующей термической обработки на формирование фазового состава, структуры и свойства образцов из сплавов Ti-6Al-4V и ВТ6. Проведенные исследования позволили выявить принципиальные различия в структурно- фазовом составе образцов, полученных методом СЛС и ПЛНМ.

Важным аспектом работы является исследование изменения морфологии выделения структурных составляющих и фазового состава после проведения вакуумного отжига и после термоводородной обработки, в частности, показано, что после термоводородной обработки могут протекать как эвтектоидное  $\beta \rightarrow \alpha + \text{TiH}_2$ -превращение, так и процессы перераспределения легирующих элементов (в первую очередь алюминия) между  $\beta$  и  $\alpha$ -фазами и формированию в последней микрообъемов, обогащенных алюминием, с последующим формированием трехфазной ( $\alpha + \alpha_2 + \beta$ )-структуры. Исследовано влияние отжига на прочностные и пластические свойства образцов, полученных методом СЛС, показано, что проведение ТВО позволяет стабилизировать структуру и существенно уменьшить разброс механических свойств заготовок. На основе исследований влияния температурно-концентрационных режимов термоводородной обработки на изменение остаточных напряжений в образцах, полученных методом СЛС установлено, что вакуумный отжиг приводит к снижению остаточных напряжений по сравнению с исходным состоянием.

В целом автором в работе сформулированы металлургические задачи, решение которых позволило разработать технологию термоводородной обработки заготовок из сплава Ti-6Al-4V, включающей режимы наводороживающего отжига.

#### Характеристика научной новизны работы

В диссертации получены результаты, имеющие существенное значение для дальнейших исследований по развитию и решению проблем промышленного использования аддитивных технологий для получения заготовок из ( $\alpha + \beta$ ) - титановых сплавов.

Автором показана эффективность применения термоводородной обработки с целью преобразования структурно-фазового состояния заготовок, что обеспечивает дальнейшее получение стабильных механических характеристик.

Установлено, что заготовки из титанового сплава ВТ6, полученные методом прямого лазерного нанесения материала (ПЛНМ), имеют ярко выраженную анизотропию свойств.

Практическая значимость работы заключается в разработке технологии термоводородной обработки заготовок из сплава Ti-6Al-4V, включающей наводороживающий отжиг с последующим охлаждением и вакуумным отжигом. Разработанная технология позволяет за счет преобразования пластинчатой структуры в мелкодисперсную, повысить предел прочности и существенно повысить циклическую долговечность.

Достоверность научных положений и результатов подтверждается совпадением экспериментальных данных и теоретических расчетов, использованием методов математической статистики при обработке результатов, а также использованием для их получения современной аппаратуры (оптическая и просвечивающая электронная микроскопия и т.д.) и комплекса информативных экспериментальных методов.

#### Замечания по диссертации

1. Структура образцов, полученных по технологии ПЛНМ из гранул, в направлении продольного роста охарактеризована как близкая к «Видманштеттовой» (рис. 3.8б), хотя на представленной фотографии внутризеренная структура не просматривается.

2. Не ясно, почему автор пористость образцов, полученных по технологии СЛС, оценивает только косвенно по плотности. В то же время пористость образцов, полученных по технологии ПЛНМ, определена также и по результатам металлографии с оценкой среднего размера пор в 40 мкм.

3. В разделе 3.3 (стр. 92) автор не комментирует со структурных позиций существенную разницу в долговечности образцов после СЛС-печати и после вакуумного отжига, а также сильный разброс (почти на порядок) числа циклов до разрушения образцов после вакуумного отжига.

4. В выводах по работе (вывод 11) предлагаемая технология термоводородной обработки включает наводороживающий отжиг до 0,8–0,85 масс. % водорода, хотя в исследованиях (глава IV) использовались концентрации 0,6 и 0,8%. Учитывая, что автор не приводит возможных отклонений от указанных концентраций, такую технологическую рекомендацию нельзя считать обоснованной.

5. На стр. 10 автореферата указано, что структура порошка и гранул одностипна и представлена  $\alpha$ -мартенситом, «что характерно для гранул двухфазных титановых сплавов». Это утверждение некорректно, т.к. не может быть распространено на двухфазные титановые сплавы с другой степенью легирования по сравнению со сплавом ВТ6.

## Заключение

Диссертация Герман Марины Александровны является законченной научной квалификационной работой, в которой изложены новые научно-обоснованные технологические решения и разработки, направленные на создание технологии термоводородной обработки заготовок из  $(\alpha+\beta)$  - титановых сплавов, полученных по аддитивным технологиям с повышенными эксплуатационными свойствами.

Автореферат и опубликованные работы полностью отражают основное содержание диссертации.

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, Герман Марины Александровны, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Ночовная Надежда Алексеевна,  
Доктор технических наук по специальности  
05.16.01 – Metallovedenie i termicheskaya  
obrabotka metallov i spлавов,  
старший научный сотрудник  
ФГУП «Всероссийский  
научно-исследовательский институт  
авиационных материалов»,  
заместитель начальника лаборатории  
«Титановые сплавы для конструкций  
планера и двигателя самолета»

  

---

29.11.2019

Подпись д.т.н., с.н.с. Ночовной Н.А. удостоверяю.

Ученый секретарь

105005 Москва  
ул. Радио, 17  
nochovnaia\_viam@mail.ru  
8-916-687-6234



Д.С. Свириденко