

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Иванова А.Е. «Влияние термической и термоводородной обработок на структуру и механические свойства монокристаллических изделий и пористых покрытий из титановых сплавов, полученных по аддитивным технологиям», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

В настоящее время большой практический интерес представляет производство изделий из металлов и сплавов с помощью аддитивных технологий, так как это открывает большие возможности для получения готовых изделий сложной конфигурации. Медицинская отрасль не является исключением, так как при производстве изделий сложной формы не всегда удается достичь результата, применяя фасонное литье и механическую обработку деформированных полуфабрикатов. Также аддитивные технологии являются перспективными для получения пористых покрытий на медицинских изделиях. Однако актуальным остается вопрос управления процессом структурообразования в изделиях, полученных с использованием аддитивных технологий, так как необходимо обеспечение требуемого комплекса свойств изделий, который определяется фазовым составом, структурой и наличием или отсутствием дефектов и остаточных напряжений после технологий получения и различных режимов обработок. Также немаловажным является вопрос обеспечения прочного соединения пористого покрытия к основе.

Научную ценность работы представляют установление закономерностей формирования фазового состава и структуры сплава ВТ1-0 и сплава типа Ti-6Al-4V (ВТ6), полученных по различным методам 3D-печати (прямое лазерное нанесение металла (ПЛНМ), селективное лазерное сплавление (СЛС)), при термической и термоводородной обработке, а также анализ текстуры и остаточных напряжений, формирующихся в заготовках после 3D-печати и различных обработок.

Большую практическую значимость представляет технология термической обработки сплава ВТ6, позволяющая обеспечить требуемый уровень твердости и чистоты поверхности, обеспечить повышение прочностных и усталостных характеристик, а также технология, включающая вакуумный отжиг на 220-270°C выше температуры полиморфного превращения сплава для обеспечения максимального физико-химического контакта между основой и пористым покрытием, полученным по аддитивным технологиям. Также автором разработан метод получения архитектуры пористого покрытия с заданным размером пор.

В работе были применены современные методы исследования структуры, механических и эксплуатационных свойств.

В качестве замечаний можно отметить следующее:

1. При исследовании влияния ТВО на структуру образцов после 3D-печати проводился наводороживающий отжиг до концентрации водорода 0,8%, что обеспечило получение однофазной  $\beta$ -структуры. Применялись ли другие режимы ТВО с меньшими концентрациями водорода, которые позволяли бы сформировать в сплаве двухфазную  $\alpha+\beta$  структуру? Данный вопрос представляет интерес, так как наличие  $\alpha$ -фазы различной морфологии, сформированной с помощью ТВО, по-видимому, также будет оказывать влияние на механические свойства сплава.

2. В таблицах 3 и 4 приведены механические свойства образцов, полученных

методом СЛС, после ТВО и вакуумного отжига, а также сделан вывод о влиянии сформировавшейся структуры на прочностные свойства и ударную вязкость. Однако для более полной оценки уровня свойств сплава после обработки следовало привести значения характеристик механических свойств того или иного вида полуфабриката согласно стандартам, либо указать требуемый для медицинских изделий уровень свойств. А также в таблице 3 не указан уровень твердости после ТВО.

3. Для образцов после вакуумного отжига приведены результаты фрактографического исследования изломов, где показано наличие пор, что справедливо может приводить к снижению ударной вязкости. Проводились ли такие исследования для сплава после ТВО, чтобы доказать или опровергнуть наличие пор в данном случае?

4. Чем обусловлен выбор температур вакуумного отжига 1150°C и 1100°C выше температуры перехода в однофазную  $\beta$ -область при обработке основы с покрытием? Рассматривались ли более низкие температуры?

5. Полученные результаты исследований дублируются в нескольких выводах. Можно написать более емко, например, объединить выводы 4 и 6, а также 5 и 7.

Указанные замечания носят уточняющий и рекомендательный характер и не снижают практическую значимость диссертации, которая выполнена на высоком научном уровне и удовлетворяет требованиям Положения ВАК РФ к кандидатским диссертациям, 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».

Заведующий кафедрой Материаловедения  
и нанотехнологий НИУ «БелГУ»  
к.ф.-м.н.

Тихонова Марина Сергеевна

Адрес организации: 308015 г. Белгород, ул. Победы 85  
ФГАОУ ВО «Белгородский государственный научный исследовательский университет»  
Электронный адрес: tikhonova@bsu.edu.ru  
Телефон: +7-4722-58545

