

ОТЗЫВ

на автореферат Герман Марины Александровны «Влияние термической и термоводородной обработок на формирование структуры и механические свойства заготовок из $(\alpha+\beta)$ титановых сплавов, полученных по аддитивным технологиям», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

В диссертационной работе Герман Марины Александровны изучалось влияние термической и термоводородной обработок на микроструктуру и некоторые механические свойства заготовок из титанового сплава ВТ6 (и его зарубежного аналога), полученных посредством двух различных аддитивных технологий – селективным лазерным сплавлением и прямым лазерным осаждением. В ходе проведенного исследования были получены следующие результаты.

1) Показано, что материал, полученный селективным лазерным сплавлением, характеризовался наличием мартенситной α' микроструктуры, относительно слабой кристаллографической текстурой и низким уровнем внутренних напряжений. С другой стороны, в образцах, полученных методом прямого лазерного осаждения металла, были выявлены пластинчатая $(\alpha+\beta)$ микроструктура, острая кристаллографическая текстура и относительно высокий уровень внутренних напряжений.

2) Установлено, что в обоих случаях обычный вакуумный отжиг не способствовал существенному улучшению микроструктуры. В частности, в заготовках, полученных селективным лазерным сплавлением, имело место фазовое превращение $\alpha' \rightarrow \alpha+\beta$, но при этом обе равновесные фазы наследовали пластинчатую микроструктуру мартенсита. С другой стороны, в материале, полученном прямым лазерным осаждением, не было выявлено существенных изменений.

3) С другой стороны, показано, что использование термоводородной обработки позволяет добиться значительного измельчения микроструктуры и снижения внутренних напряжений и, как следствие, способствует существенному улучшению баланса их механических свойств. В частности, в образцах, полученных селективным лазерным сплавлением, удалось сформировать мелкодисперсную $(\alpha+\beta)$ микроструктуру и, таким образом, значительно повысить прочностные характеристики материала (в том числе и усталостную прочность) без заметной потери пластичности и, кроме того, существенно уменьшить экспериментальный разброс.

4) На основании проведенных исследований была разработана технология термоводородной обработки, позволяющая добиться значительного повышения баланса свойств аддитивных полуфабрикатов из сплава ВТ6 за счет управления их микроструктурой.

На мой взгляд, это отличная работа. Я полностью согласен с автором в том, что метод повышения служебных характеристик изделий аддитивного производства за счет совершенствования технологии 3Д печати близок к исчерпанию. Таким образом, следующим шагом на пути управления свойствами является модификация микроструктуры «напечатанных» изделий. Однако, учитывая уникальность формы изделий аддитивного производства, использование пластических деформаций является нежелательным и, таким образом, задача модификации микроструктуры является нетривиальной. В рамках данной диссертационной работы разработан очень элегантный (но при этом весьма эффективный!) способ достижения этой цели для двухфазных титановых сплавов. Предложенный метод основан на эффекте обратимого фазового превращения $\alpha+\beta \rightarrow \beta \rightarrow \alpha+\beta$ за счет предварительного наводороживания и последующей дегазации титана. Данная последовательность фазовых превращений позволяет

добиться формирования дисперсной двухфазной микроструктуры и, за счет этого, значительно улучшить баланс механических характеристик полуфабрикатов.

Экспериментальные данные были широко представлены на международных и всероссийских научно-практических конференциях, а также опубликованы в научной литературе.

Несмотря на очень высокий научный уровень представленной работы, у меня возник ряд вопросов после ознакомления с авторефератом.

(1) Как я могу предположить, качество полуфабрикатов аддитивного производства, а также их микроструктура и свойства являются чувствительными к параметрам 3D печати. К сожалению, из автореферата не ясно, какие именно параметры использовались в рамках данной диссертационной работы, и чем именно был продиктован их выбор.

(2) Также не вполне понятна система координат аддитивного производства, использованная в представленной работе. Насколько я могу судить из литературы, одним из ключевых направлений в аддитивных технологиях является направление нанесения слоев (так называемое «building direction»). К сожалению, на Рис. 2 автореферата ориентация этой оси является не вполне очевидной.

(3) Вследствие специфики аддитивного производства, нижние слои «напечатанного» материала должны подвергаться термоциклированию в ходе расплавления верхних слоев. Данный эффект должен приводить к частичному снятию их внутренних напряжений. Исходя из этого, я предполагаю, что поле внутренних напряжений в изделиях аддитивного производства должно быть неоднородным. В этой связи было бы интересно знать, в какой (или в каких) именно областях «напечатанных» деталей производилось измерение внутренних напряжений и почему результаты этих измерений были признаны представительными для характеристики всей детали в целом.

(4) Тот же самый вопрос относится к проведению микроструктурных исследований. Учитывая относительно низкую теплопроводность титана, скорость его кристаллизации возле подложки может существенно отличаться от скорости охлаждения в центральной части заготовки. Исходя из этого, было бы интересно знать, оценивал ли автор макроскопическую однородность микроструктуры в «напечатанных» деталях и как именно выбирал область для микроструктурного анализа.

(5) Исходя из относительно низкого уровня напряжений, а также отсутствия выраженной кристаллографической текстуры в материале, полученном селективным лазерным сплавлением, можно предположить, что скорость охлаждения в данном случае была относительно низкой. С другой стороны, учитывая высокий уровень внутренних напряжений и формирование острой кристаллографической текстуры в образцах, «напечатанных» посредством прямого лазерного осаждения, можно предположить, что скорость охлаждения была относительно большой. В этой связи не вполне понятно, почему в первом случае формировалась мартенситная структура, а во втором – более равновесная $\alpha+\beta$ микроструктура.

(6) Я не уверен, что анизотропия в материале, полученном прямым лазерным осаждением, является ярко выраженной. Разница в пределе прочности составляет около 7%, что близко к экспериментальному разбросу при проведении испытаний на растяжение.

(7) Как следует из Рис. 7а-б, текстура, сформировавшаяся в материале, полученном прямым лазерным осаждением, является относительно сложной. Кроме базовой компоненты (связанной, очевидно, с фазовым превращением $\beta \rightarrow \alpha+\beta$), на обратных полюсных фигурах выявляются также дополнительные пики. Связано ли их наличие со спецификой аддитивного производства или же просто обусловлено экспериментальным разбросом?

(8) Было бы интересно узнать мнение автора по поводу механизма формирования острой кристаллографической текстуры в материале, полученном прямым лазерным осаждением, а также в ходе термоводородной обработки образцов, полученных

селективным лазерным сплавлением. Означает ли это селекцию кристаллографических вариантов в ходе фазовых превращений?

Впрочем, я убежден, что возникновение всех вышеуказанных вопросов обусловлено жесткими ограничениями, налагаемыми на объем автореферата, а необходимые подробности изложены в тексте диссертации и исчерпывающе описаны в научных публикациях автора.

На мой взгляд, представленная диссертационная работа является законченным научным исследованием, выполненным на хорошем методическом уровне и отвечающим всем критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук в соответствии с «Положением о присуждении ученых степеней» ВАК РФ. Соответственно, её автор, Герман Марина Александровна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Ведущий научный сотрудник
Лаборатории механических свойств наноструктурных и жаропрочных материалов Федерального Государственного автономного Образовательного Учреждения высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (НИУ «БелГУ»), 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85
д.ф.-м.н. по специальности 01.04.07
Миронов Сергей Юрьевич
Тел.: +74722585456
Email: mironov@bsu.edu.ru

Мир

(с обработкой персональных данных согласен)

