УДК 539.25:539.26: 539.382.2

**СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ
И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА Ti-6Al-4V, ПОЛУЧЕННОГО
РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ**

М.А. Кругляков

Научный руководитель: к.т.н. Е.Н. Степанова

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: Kruglyakov97@tpu.ru

**COMPARATIVE STUDIES OF THE STRUCTURAL-PHASE STATE AND MECHANICAL
PROPERTIES OF Ti-6Al-4V TITANIUM ALLOY OBTAINED BY VARIOUS METHODS**

M.A. Kruglyakov

Scientific Supervisor: Ph.D., E.N. Stepanova

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

Email: Kruglyakov97@tpu.ru

***Abstract.** The aim of the work was to carry out comparative studies of the structural-phase state and mechanical properties of the Ti-6Al-4V alloy obtained by various methods. With increasing temperature, Ti-6Al-4V alloys acquire improved plasticity properties while decreasing strength. Analysis of fractograms of the fracture surface showed that at room and at elevated temperatures, areas of ductile fracture are observed, characterized by the presence of microdepressions on the fracture surface. With an increase in temperature on the fracture surface, the formation of pores is observed in the EBM samples, which is one of the main reasons for the deterioration of the plasticity characteristics of the samples.*

Введение. Необходимость производства сплавов на основе титана привела к стремительному развитию промышленности по изготовлению данных материалов. Аддитивное производство – один из таких методов, включающий в себя несколько методик, одной из которых является электронно-лучевое сплавление (ЭЛС). Широкая область применения метода обусловлена возможностью создания изделий с градиентными свойствами. ЭЛС предоставляет возможность изготовления деталей с высокой точностью, сложными внутренней структурой и внешней формой с возможностью внесения коррективов в процессе печати [1].

Целью данной работы являлось исследование структурно-фазового состояния и механических свойств сплава Ti-6Al-4V, полученного различными методами, в частности классическим и аддитивным.

Экспериментальная часть. В качестве материала был использован сплав Ti-6Al-4V, предварительно полученный классическим методом, подверженный многостадийной обработке, и методом ЭЛС. Пробоподготовка производилась шлифованием на наждачной бумаге с различной фракцией размера зерна. Электрополирование: электролит: 80 об. % ледяной уксусной кислоты и 20 об. % хлорной кислоты (напряжение 10 В, время полировки 30 с). Травление образцов проводили в 2% растворе HF и H₂O. Микроструктура сплава: растровый электронный микроскоп Philips SEM 515. Рентгеноструктурный анализ (РСА): Shimadzu XRD 7000. Испытания на растяжение: испытательная машина ПВ-2013М при 25-600°C.

Результаты. По результатам сканирующей электронной микроскопии структура образцов, изготовленных методом ЭЛС, характеризуется наличием относительно крупных исходных β -зерен (размер которых варьируется от 40 до 100 мкм), внутренний объем которых представлен α -пластинами с толщиной 0,5 мкм, объединенными в колонии. В состоянии, полученном традиционным способом, образец сплава Ti-6Al-4V имеет поликристаллическую структуру, состоящую из неравноосных зерен α фазы титана и прослоек β фазы титана между ними. В прослойках β фазы наблюдаются пластинки и частицы α фазы. Размеры зерен α фазы изменяются в пределах 10-20 мкм в продольном и поперечном сечении, а размеры прослоек $\alpha+\beta$ фазы – в пределах 5-10 мкм.

Рентгеноструктурный анализ показал, что сплав Ti-6Al-4V вне зависимости от метода изготовления является двухфазным и содержит α и β фазы титана в разном процентном соотношении. Полученные значения отличаются от табличных для α титана ($a = 2,9250 \text{ \AA}$, $c = 4,8660 \text{ \AA}$) и β титана ($a = 3,2830 \text{ \AA}$) в связи с наличием легирующих элементов в сплаве.

Испытания на одноосное растяжение показали, что для кривых «напряжение – деформация» как ЭЛС, так и литых образцов сплава Ti-6Al-4V характерно в общем случае наличие трех стадий деформации: упрочнения, установившейся деформации и разупрочнения. Особенностью кривых «напряжение-деформация» для обоих материалов является относительно короткая стадия установившейся деформации, за которой следует продолжительная стадия падающего напряжения, на которой можно выделить два участка с разными скоростями снижения напряжения.

В таблице 1 представлены механические характеристики сплавов Ti-6Al-4V: предел текучести ($\sigma_{0,2}$), предел прочности (σ_B), однородная деформация (ϵ_B) и деформация до разрушения (ϵ).

Таблица 1

Механические свойства образцов титанового сплава Ti-6Al-4V

Состояние	Температура, °C	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	ϵ_B , %	ϵ , %
ЭЛС	25	1071	1132	2,6	3,2
	450	592	703	4,8	14,4
	600	520	563	3,7	23,0
Литой	25	971	1018	7	17,0
	450	570	660	10,5	22,9
	600	434	471	5,6	56,5

Анализируя данные таблицы 1 можно сделать вывод о том, что во всем исследованном диапазоне температур прочностные характеристики ЭЛС сплава Ti-6Al-4V превышают соответствующие значения для литых образцов в 1,1-1,2 раза. В то же время, для ЭЛС-образцов с повышением температуры величины пластических характеристик меньше аналогичных величин для образцов, полученных традиционным образом в 5,3 раза, 1,6 раза, 2,5 раза, соответственно.

Полученные данные согласуются с данными, полученными в работе [2], где были исследованы механические свойства литого сплава после обработки поверхности электронным пучком, в частности σ_B и ϵ_B . В работе [3] значения параметра σ_B при комнатной температуре для литых образцов варьируются в диапазоне 1094-1140 МПа, а значения параметра ϵ_B в диапазоне 6,4-9,9 %. В работе [4] исследовались механические свойства литого сплава (σ_B) при комнатной температуре, показавшие значения сопоставимые с данными таблицы 1, а именно 1050 МПа. Также в данной работе были получены значения σ_B при температуре 400°C, где предел прочности сплав составил 780 МПа [4].

Сравнительный анализ микроструктуры показал, что при повышении температуры до 450°C наблюдаются области вязкого разрушения с наличием дефектов, пор, размерами 15-20 мкм. При повышении температуры до 600°C число дефектов увеличивается, также увеличивается их размер; поверхность разрушения сплава в обоих состояниях имеет вид вязкого чашечного излома, а на поверхности разрушения ЭЛС-сплава наблюдаются поры размером 20-30 мкм; цепочки пор размером 5-10 мкм.

Заключение. В работе были представлены и описаны структура и фазовый состав исследуемого сплава, а также объяснены особенности влияния структуры на механические свойства исследуемого материала. Исследования структурно-фазового состояния показали, что для данного сплава характерно наличие двух фаз ($\alpha+\beta$) с объемной долей α -фазы, равной 91,8% для ЭЛС-образца и 89,8% для литого. Показано, что во всем исследованном диапазоне температур прочностные характеристики ЭЛС сплава Ti-6Al-4V превышают соответствующие значения для литых образцов в 1,1-1,2 раза. В то же время, для ЭЛС-образцов с повышением температуры величины пластических характеристик меньше аналогичных величин для образцов, полученных традиционным образом в 5,3 раза, 1,6 раз, 2,5 раза, соответственно. Анализ микроструктуры показал, что по всей площади поверхности разрушения как при комнатной, так и при повышенной температурах наблюдаются области вязкого разрушения, характеризующегося наличием ямочек, микроуглублений на поверхности излома. При повышении температуры у ЭЛС образцов на поверхности разрушения наблюдаются поры размером 20-30 мкм; цепочки пор размером 5-10 мкм. Наличие пор – одна из причин ухудшения пластических характеристик образцов, полученных методом ЭЛС по сравнению с литыми образцами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания в рамках научного проекта № FSWW-2021-0017

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Szymczyk-Ziolkowska P., Hoppe V., Rusinska M., Gasiorek J., Ziolkowski G., Dydak K., Czajkowska J., Junka A. The Impact of EBM-Manufactured Ti6Al4V ELI Alloy // Materials Science and Engineering A. – 2020. – Vol. 13. – P. 1-22. doi:10.3390/ma13122822.
2. Panin A.V. et al. Multiscale deformation of commercial titanium and Ti — 6Al-4V alloy subjected to electron beam surface treatment // Physical Mesomechanics. – 2018. – V. 21., №. 5. – P. 441-451.
3. Синьмин Ц. Влияние водорода на механические свойства титанового сплава Ti-6Al-4V // Электронный научный архив ТПУ, 2017. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/39663>. (Дата обращения 03.04.2023)
4. Валиев Р.Р. Повышение эксплуатационных свойств титанового сплава на основе измельчения зеренной микроструктуры и модификации поверхности: Автореф. Дис. ... канд. Техн. наук. – Уфа, 2018. – 20 с.