

УДК 621.785:669.295-15

А. А. ПЕДАШ, В. В. КЛОЧИХИН, Т. А. МИТИНА, В. Г. ШИЛО

АО "МОТОР СИЧ", Запорожье, Украина

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПОДВОДА ЭНЕРГИИ ПРИ 3D-ПРИНТИНГЕ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ДЕТАЛЕЙ ИЗ СПЛАВА Ti-6Al-4V

В статье изучены состав, структура и свойства образцов из сплава Ti-6Al-4V, полученных по технологиям селективного лазерного (SLM) и электронно-лучевого (EBM) плавления применительно к производству деталей авиационного назначения. Проведено сравнительно исследование структуры и свойств образцов после термической обработки характерной для сплава Ti-6Al-4V с и без предварительного горячего изостатического прессования (ГИП). Установлено, что выявление в изломах и в микроструктуре пор и несплавленных гранул обуславливает обязательное проведение ГИП деталям ответственного назначения, когда происходит устранение подобного вида дефектов и соответственно обеспечивается лучший комплекс прочностных свойств и характеристик пластичности.

Ключевые слова: титановый сплав, аддитивные технологии, лазерное плавление, электронно-лучевое плавление, микроструктура, механические свойства.

Введение

При изготовлении деталей из титановых сплавов все более широкое применение находят аддитивные технологии (технологии 3D-печати) сущность которых заключается в получении изделия путем послойного наращивания материала на основе компьютерной модели будущей детали на специальном оборудовании (3D-принтерах) с использованием различных методов (SLM, EBM, DMLS, DMD и др.).

На данный момент разработана широкая гамма технологий изготовления деталей методом 3D-принтинга, в том числе и из титановых сплавов, с использованием машин, в которых в качестве источника подвода энергии к материалу построения (мелкодисперсному порошку), как правило, применяются лазер (один или несколько) или электронный луч. При использовании в качестве подвода энергии лазера или электронного луча реализуются как определенные преимущества, так и недостатки, влияющие на качество изготавливаемой детали в целом. В литературе отмечается [1-6], что технология селективного лазерного сплавления (SLM) обеспечивает хорошее качество поверхности, а установки, которые используют в качестве источника энергии электронный луч (EBM) характеризуются увеличенной производительностью, меньшей себестоимостью готовой продукции и повышенной плотностью материала.

Целью работы было провести сравнительное исследование технологий изготовления деталей, полученных с использованием в качестве подвода

энергии лазеров и электронного луча с целью определения рациональной технологии при изготовлении деталей авиационной техники.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта для исследований использовали образцы из сплава Ti-6Al-4V для испытания механических свойств и микроструктуры, полученные методами селективного лазерного плавления и сплавлением электронным лучом.

Фракции гранул, используемых при изготовлении образцов, составляла 20-50 мкм при получении лазерным сплавлением и 45-105 мкм при получении образцов электронно-лучевым сплавлением. Указанные порошки были получены по технологии газоструйного распыления расплава инертным газом. Образцы получали как цилиндрические \varnothing 14 мм, так и прямоугольного сечения \square 16 мм. Длина образцов составляла 60 мм. Построение образцов на 3D-принтере осуществляли в направлении Z.

Для устранения внутренней пористости и повышения плотности образцов после процесса печати выполняли горячее изостатическое прессование (ГИП) на горячем изостатическом прессе ф. QUINTUS, Швеция. ГИП проводили по режиму: 920 ± 10 °C с длительностью выдержки 2 ч., давление рабочего газа в сосуде высокого давления составляло 100 МПа.

Образцы после ГИП подвергали термической обработке в вакуумной печи по режиму: Нагрев 750 ± 10 °C с выдержкой в 1,5 ч. в среде динамического вакуума $1 \times 10^{-1} \dots 5 \times 10^{-2}$ мбар, охлаждение в

потоке инертного газа (аргона).

Для проведения сравнительных исследований часть образцов не подвергали ГИП, а проводили термическую обработку непосредственно после печати.

После обработки по указанным вариантам заготовки проходили механическую обработку для обеспечения размеров, предусмотренных технической документацией на изготовление образцов для механических испытаний.

Химический состав сплава определяли методами спектрального и химического анализов.

Механические свойства (σ_b , σ_{02} , δ , ψ) образцов испытывали на разрывной машине ZDMY 30 на соответствие требованиям стандарта AMS4928, и отраслевых стандартов ОСТ1 90002 и ОСТ1 90006 на отечественный титановый сплав ВТ-6, применяемого традиционно для изготовления ответственных деталей и узлов в авиационной промышленности.

Ударную вязкость KCU определяли на ударных образцах, испытанных на маятниковом копре Instron SI-1M.

Фрактографическое исследование изломов проводили на разрушенных при механических испытаниях разрывных и ударных образцах под бинокулярным микроскопом STEMI 2000-C.

Макроструктуру изучали на шлифах, изготовленных из разрывных и ударных образцов в поперечном и продольном направлениях.

Исследование микроструктуры проводили на травленных микрошлифах в поперечном и продольном сечениях на микроскопе «Axio Observer. Dlm» при увеличении $\times 500$.

Анализ и обсуждение полученных результатов

По результатам исследования установлено, что химический состав исследуемых вариантов изготовления образцов по основным элементам удовлетворительный, соответствует требованиям стандарта AMS 4928 для сплава Ti-6Al-4V и находится примерно на одном уровне у всех исследуемых вариантов (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав опытных образцов исследуемых вариантов технологии

Вариант технологии	Содержание элементов, %			
	Ti	Al	V	C
SLM	Осн.	5,9	4,3	0,06
EBM	Осн.	5,8	4,0	0,07
Нормы AMS 4928	Осн.	5,5-6,75	3,5-4,5	$\leq 0,08$

Визуальный и осмотр с помощью бинокулярного микроскопа показал, что макроструктура образцов исследуемых технологий изготовления, как до, так и после ГИП, характеризуется проявлением макрозерна величиной 1...3 балла при оценке по шкале макроструктур принятой для титановых сплавов в авиационной промышленности (рис. 1).

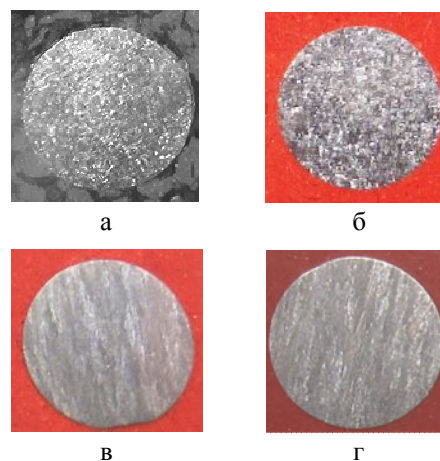


Рис. 1. Макроструктура образцов полученных по технологии SLM (а, б) и EBM (в, г), $\times 3$: а, в – до ГИП, б, г – после ГИП

Трещин, расслоений, недопустимых неметаллических включений, участков ликвационного происхождения, видимых невооруженным глазом, в макроструктуре исследуемых образцов не обнаружено.

Фрактографическое исследование показало, что изломы ударных и разрывных образцов характеризуются мелкокристаллическим строением и имеют светлый оттенок. В некоторых образцах до ГИП обнаружены единичные поры и выступающие частицы округлой формы, представляющие собой, вероятно, несплавленные частицы исходного порошка (рис. 2). Подобное характерно для образцов, полученных по обоим исследуемым технологиям сплавления. В изломах образцов подвергнутых ГИП, пор и выступающих частиц не обнаружено (рис. 3).

Микроструктура образцов полученных по исследуемым технологиям изготовления характеризуется наличием удлиненной пластинчатой альфа-фазы в преобразованной эпитаксиально выращенной бета-матрице и является характерной для сплава Ti-6Al-4V в термообработанном состоянии (рис. 4). Пластинчатая альфа-фаза в структуре образцов, прошедших ГИП отличается более широкими размерами по сравнению с образцами до ГИП. Следует отметить отсутствие непрерывной цепи альфа-фазы на межзеренных границах преобразованной бета-фазы. При металлографическом исследовании суще-

ственных различий в микроструктуре образцов в продольном и поперечном сечениях не отмечено.

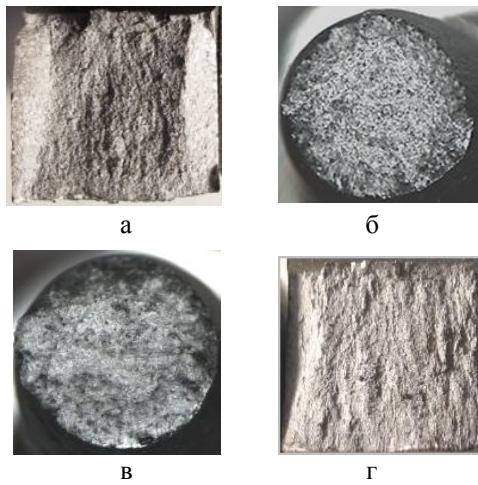


Рис. 2. Фрактография изломов образцов полученных по технологии SLM (а, б) и EBM (в, г) после механических испытаний, х3: а, б – до ГИП, в, г – после ГИП

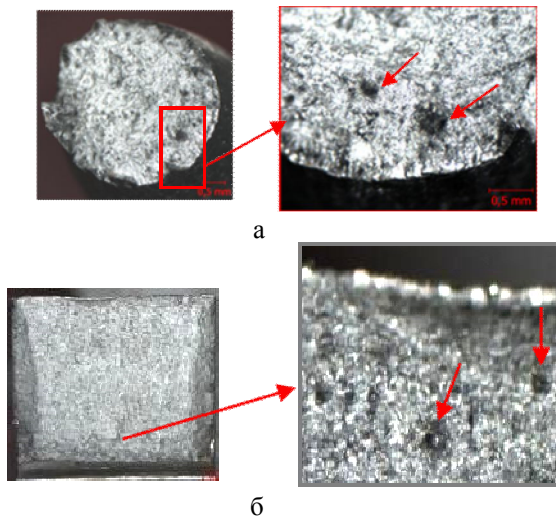


Рис. 3. Поры и включения в изломах образцов, полученных по технологии SLM (а) и EBM (б) до ГИП

В образцах до ГИП при микроанализе выявлены единичные дефекты в виде несплавлений и микропор диаметром 4...32 мкм (рис. 5). После проведения ГИП структура характеризуется практически полным отсутствием подобного вида дефектов.

Механические свойства образцов полученных с использованием обеих технологий (как до, так и после проведения ГИП) соответствуют требованиям стандарта AMS 4928 и отечественных стандартов ОСТ1 90002 и ОСТ1 90006 применяемых при изготовлении ответственных деталей авиационного назначения и находятся примерно на одном уровне (табл. 2).

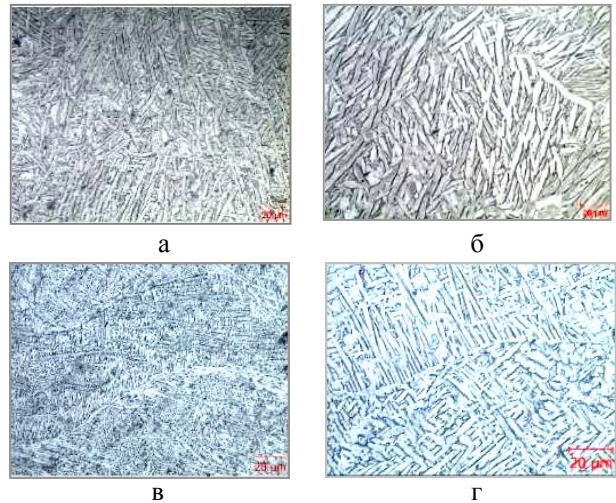


Рис. 4. Микроструктура образцов полученных по технологии SLM (а, б) и EBM (в, г), ×500: а, в – до ГИП, б, г – после ГИП

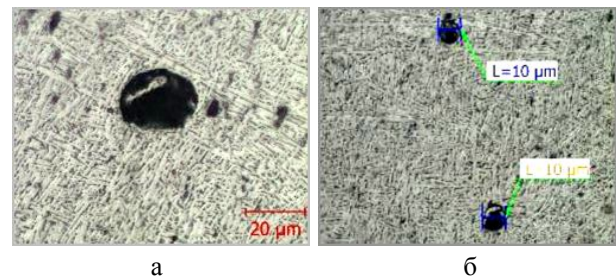


Рис. 5. Микропористость и несплавления гранул в микроструктуре образцов, полученных по технологии SLM (а) и EBM (б) до ГИП, ×500

Таблица 2
Механические свойства опытных образцов исследуемых вариантов технологии

Вариант технологии	Механические свойства (средние) при t=20°C				
	σ_b , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²
SLM Т/о	961	922	15,6	39,0	33,1
EBM	1006	959	15,2	42,7	47,9
SLM ГИП+	942	920	13,4	45,1	63,2
EBM т/о	960	914	14,6	41,2	44,7
Нормы AMS 4928	≥896	≥827	≥10,0	≥20,0	-
ОСТ1 90002 (среднегабаритные штамповки из сплава ВТ-6 после ТМО и старения)	930-1180	-	≥9	≥25	≥35
ОСТ1 90006 (горячекатаный пруток из сплава ВТ-6)	930-1130	-	≥10	≥35	≥35

Из результатов испытаний видно, что прочностные свойства образцов, прошедших ГИП несколько ниже прочности образцов, не подвергав-

шихся ГИП, при этом для значений характеристик пластичности и ударной вязкости наблюдается обратная зависимость. Заметно высшие значения ударной вязкости в образцах, полученных по технологии SLM после ГИП по-видимому связаны с образованием более глыбистой и пластинчатой альфа-фазы и удлиненными бета-зернами, формирующими колонию с более постоянным равномерным размером.

Выводы

1. Таким образом, изготовление деталей и заготовок по 3D-технологиям с использованием в качестве источника энергии лазера или электронного луча обеспечивают уровень механических свойств сплава Ti-6Al-4V в соответствии с нормативной документацией на продукцию авиационного назначения.

2. Выявление в изломах и в микроструктуре пор и несплавлений гранул обуславливает обязательное проведение ГИП деталям ответственного назначения, полученных методом 3D-принтинга для существенного улучшения структурного состояния.

3. В рамках перспективных работ при изготовлении деталей авиационной техники по исследуемым технологиям авторы планируют проведение ряда работ по опробованию изготовления образцов и реальных деталей из гранул титанового сплава Ti-6Al-4V полученных плазменным центробежным распылением, характеризующихся лучшей сферичностью формы и отсутствием наследственных гранул.

Литература

1. *Аддитивные технологии и изделия из металла: пособие для инженеров [Текст] / М. А. Зленко и др. – М.: ГНЦ РФ ФГУП НАМИ 2015. – 220 с.*

2. Edwards, P. *Electron beam additive manufacturing of titanium components: properties and performance [Text] / P. Edwards, A. O'Conner, M. Ramulu // Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transaction of the ASME. – 2013. – vol. 135, iss. 6. DOI: 10.1115/1.4025773.*

3. *A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti [Text] / L. Thijs, F. Verhaeghe, T. Craeghs at all. // Acta Materialia. – 2010. – № 58 (9). – P. 3303-3312.*

4. *Microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V manufactured by electron beam melting process [Text] / A. Mohammadhosseini, D. Fraser, S. Masood at all // Materials Research Innovations. – 2013. – № 17. – P. 106-112.*

5. Froes, F. H. *Titanium Powder Metallurgy: Developments and opportunities in a sector poised for growth [Text] / F. H. Froes // Powder Metallurgy Review. – 2013. – Vol. 2, № 4. – P. 29-43.*

6. Burghardt, Kl. Den. *Additive Manufacturing – Selective Electron Beam Melting [Electronic resource]. Access mode: http://ifam.fraunhofer.de/content/dam/ifam/en/documents/dd/infoblter/additive_manufacturin_g-electron_beam_melting_fraunhofer_ifam_dresden.pdf – 20.10.2016.*

References

1. Zlenko, M. A. *Additivnyie tekhnologii I izdeliya iz metalla. Posobiye dlya inzhenerov [Additive manufacturing and metal parts. Engineers guideline]. Moscow, GNC RF FGUP NAMI Publ., 2015. 220 p.*

2. Edwards, P., O'Conner, A., Ramulu, M. *Electron beam additive manufacturing of titanium components: properties and performance. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transaction of the ASME, 2013, vol. 135, iss. 6. DOI: 10.1115/1.4025773.*

3. Thijs, L., Verhaeghe, F., Craeghs, T., Humbeeck, J. V., Kruth, J. P. *A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti. Acta Materialia, 2010, no. 58 (9), pp. 3303-3312.*

4. Mohammadhosseini, A., Fraser, D., Masood, S., Jahedi, M. *Microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V manufactured by electron beam melting process. Materials Research Innovations, 2013, no. 17, pp. 106-112.*

5. Froes, F. H. *Titanium Powder Metallurgy: Developments and opportunities in a sector poised for growth. Powder Metallurgy Review, 2013, vol. 2, no. 4, pp. 29-43.*

6. Burghardt, Kl. Den. *Additive Manufacturing – Selective Electron Beam Melting. Available at: http://ifam.fraunhofer.de/content/dam/ifam/en/document/s/dd/infoblter/additive_manufacturing-electron_beam_melting_fraunhofer_ifam_dresden.pdf (accessed 20.10.2016).*

Поступила в редакцию 29.05.2018, рассмотрена на редколлегии 27.07.2018

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЙ ПІДВЕДЕННЯ ЕНЕРГІЇ ПРИ 3D-ПРИНТИНГУ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ДЕТАЛЕЙ ЗІ СПЛАВУ Ti-6Al-4V

О. О. Педаш, В. В. Ключихін, Т. А. Міміна, В. Г. Шило

В статті вивчено склад, структура та властивості зразків зі сплаву Ti-6Al-4V, що було отримано за технологіями селективного лазерного (SLM) і електронно-променевого (EBM) плавлення стосовно виробницт-

ва деталей авіаційного призначення. Проведено порівняльне дослідження структури й властивостей зразків після термічної обробки, що є властивою для сплаву Ti-6Al-4V з й без попереднього гарячого ізостатичного пресування (ГІП). Встановлено, що поява в зламах та в мікроструктурі пор й несплавлень гранул зумовлює обов'язкове проведення ГІП деталям відповідального призначення, коли відбувається усунення подібного виду дефектів й відповідно забезпечується кращий комплекс характеристик міцності й пластичності.

Ключові слова: титановий сплав, адитивні технології, селективне лазерне плавлення, електронно-променево плавлення, мікроструктура, механічні властивості.

EFFECT OF THE POWER SUPPLY ON STRUCTURE AND PROPERTIES OF Ti-6Al-4V ALLOY PARTS DURING 3D-PRINTING

A. A. Pedash, V. V. Klochikhin, T. A. Mitina, V. G. Shylo

The composition, structure and mechanical properties of samples obtained from the titanium alloy Ti-6Al-4V, by selective laser melting and electron beam melting processes regarding production of responsible aviation parts were carrying-out at present article.

A comparative study of macro- and microstructure, mechanical properties has been carried out after inherent of Ti-6Al-4V heat treatment with or without prior hot isostatic pressing.

It was established that the advent in specimens fractures and microstructure pores and non-melt inclusions of a granules condition obligatory hot isostatic pressing of a responsible parts when this kinds of defects significantly releases and correspondingly best complex of mechanical properties are obtained.

The powders from titanium Ti-6Al-4V alloy were produce by inert gas (argon) spraying process and had a different particle sizing distribution: 20-50 microns for selective laser melting and 45-105 microns for electron beam melting.

The microstructure of the specimens prepared using the studied production processes features an elongated lamellar alpha phase in the transformed epitaxially grown beta-matrix and is typical for Ti-6Al-4V alloy in a heat-treated condition.

It has been noted that the lamellar alpha phase in the structure of the studied specimens after hot isostatic pressing is distinguished by larger sizes in width as compared to the specimens prior to hot isostatic pressing processing.

Mechanical properties of the specimens produced by selective laser melting or electron beam melting processes meet the specification requirements. Hot isostatic pressing processing results in a remarkable improvement of the impact strength.

Authors should be pointed out that application of additive technologies in the manufacture of aerospace parts requires extensive research&development works, and testing efforts to confirm repeatability of alloy characteristics. A mandatory procedure of the production process and material approval shall be conducted to ensure compliance with aircraft flight safety standards and regulations.

Keywords: titanium alloy, additive technologies, selective laser melting, electron beam melting, microstructure, mechanical properties.

Педаш Алексей Александрович – канд. техн. наук, начальник бюро управления главного металлурга АО «МОТОР СИЧ», Запорожье, Украина, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

Клочихин Владимир Валериевич – главный металлург АО «МОТОР СИЧ», Запорожье, Украина, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

Митина Тамара Александровна – ведущий инженер управления главного металлурга АО «МОТОР СИЧ», Запорожье, Украина, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

Шило Валерий Григорьевич – начальник отдела управления главного металлурга АО «МОТОР СИЧ», Запорожье, Украина, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

Pedash Alexey Alexandrovich – PhD., bureau chief in chief of metallurgical engineers department JSC «MOTOR SICH», Zaporozhye, Ukraine, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com

Klochikhin Vladimir Valerievich – Chief of metallurgical engineers department JSC «MOTOR SICH», Zaporozhye, Ukraine, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

Mitina Tamara Alexandrovna – project engineer of JSC «MOTOR SICH», Zaporozhye, Ukraine, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

Shilo Valeriy Grigorievich – Chief of the department JSC «MOTOR SICH», Zaporozhye, Ukraine, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.