

Влияние параметров селективного лазерного сплавления на пористость образцов из сплава TiAl6V4*

Байтимеров Р.М., Радионова Л.В.

Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)
г. Челябинск, Российская Федерация
baitimeroovrm@susu.ru, radiovalv@susu.ru

Сафонов Е.В.

Московский политехнический университет
г. Москва, Российская Федерация
e.v.safonov@mospolytech.ru

Аннотация. В работе исследовался процесс селективного лазерного сплавления (SLM) титанового сплава TiAl6V4, широко применяемого в аэрокосмической отрасли и медицине. С использованием различных параметров процесса были изготовлены образцы с размерами 10x10x5 мм. Пористость изготовленных образцов определялась методом исследования шлифов с использованием микроскопа. Все полученные образцы имели плотную структуру и высокое качество поверхности. Наименьшая пористость, которую удалось достичь была порядка 0,5%.

Ключевые слова: селективное лазерное сплавление, порошковая металлургия, аддитивные технологии, пористость, титановый сплав, TiAl6V4.

ВВЕДЕНИЕ

Аддитивные технологии (AM) и селективное лазерное сплавление (SLM) в частности все чаще применяются в наши дни при изготовлении металлических изделий [1-5]. В сравнении с традиционными методами производства деталей селективное лазерное сплавление имеет ряд преимуществ. К преимуществам метода относится возможность изготовления деталей сложной формы с внутренними каналами охлаждения, высокая скорость и сравнительно низкая стоимость производства малых партий или единичных изделий (прототипы, медицинские импланты), малое количество отходов [3, 5, 6]. Однако, процесс селективного лазерного сплавления определяется большим количеством параметров (мощность лазера, скорость движения лазера, толщина слоя сплавляемого порошка, расстояние между точками, время выдержки лазера в одной координате, расстояние между треками, длина трека, стратегия сканирования, температура рабочего стола, рабочая атмосфера и др.), что значительно усложняет оптимизацию процесса при работе с разными сплавами. Наличие комплекса таких свойств, как высокая прочность, коррозионная стойкость, низкая плотность, и биосовместимость обуславливает широкое применение титанового сплава TiAl6V4 в аддитивных технологиях сплавов [7-19].

Целью данной работы является исследование процесса селективного лазерного сплавления титанового сплава TiAl6V4 при использовании двухсотваттного лазера.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследование порошка. В данной работе использовался порошок, полученный распылением титанового

сплава TiAl6V4 в газовой струе. Порошок исследовался с применением электронного микроскопа JSM-6400LV и оптического анализатора Occhio 500nano.

На снимках порошка, полученных на электронном микроскопе (рис. 1), видно, что большинство частиц имеют сферическую форму.

В работе использовался порошок сплава TiAl6V4 фракцией 20-63 мкм, средний размер частиц – 42 мкм. Текучесть порошка – 19 с (ГОСТ 20899-98), насыпная плотность – 2482 кг/м³ (56.2%). Средняя сферичность (по параметру ISO Roundness) составляет 66,33%.

Селективное лазерное сплавление. Исследования проводились на установке SINTERSTATION® Pro DM125 SLM System, параметры которой представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры SLM установки

Максимальная мощность лазера	200 Вт
Скорость сканирования	до 1000 мм/с
Толщина слоя	20-100 мкм
Диаметр пятна лазера	35 мкм
Область построения изделия	125x125x125 мм
Рабочая атмосфера	аргон

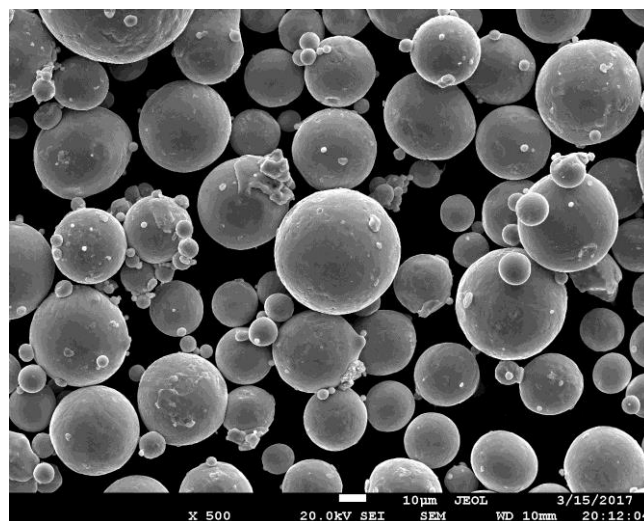


Рис. 1. Снимок порошка TiAl6V4, полученный на электронном микроскопе JSM-7001F

* Исследования проводились при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках гранта Президента Российской Федерации (№ МК-1881.2017.8).

Для определения влияния параметров SLM на структуру получаемого материала с использованием различных режимов сплавления были изготовлены образцы размерами 10x10x5 мм. Сплавление производилось в инертной атмосфере (аргон). Толщина слоя – 50 мкм. Изменяемые параметры (табл. 2): мощность лазера (laser power), расстояние между соседними сплавляемыми точками (point distance), время выдержки (exposure time), ширина штриха (hatch space).

Таблица 2

Режимы SLM процесса

Параметр SLM процесса	Величина
Laser power, Вт	100, 150, 175, 200
Point distance, мкм	50, 200
Exposure time, мкс	50, 100, 125, 150, 175
Hatch space, мкм	50, 100, 150

Исследование пористости. При определении пористости полученных образцов применялись два метода исследования шлифа на оптическом микроскопе [20]. Для исследования каждого образца изготавливались по 2 шлифа: совпадающий с направлением выращивания образца и перпендикулярный направлению выращивания. Каждый образец заливался бакелитом, затем шлифовался, полировался и травился. Для определения пористости использовались микроснимки шлифов, не подвергнутые травлению. В каждом сечении было сделано 10 случайно выбранных микроснимков. Площадь пор определялась с помощью средств обработки изображений MATLAB.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлено фото шлифа, характеризующего наименьшей пористостью (0,5%), поры имеют правильную круглую форму и небольшие размеры. Предположительно, появление пор в данном случае связано с растворением газов в металле во время расплавления (при увеличении температуры растворимость газов обычно увеличивается) [21].

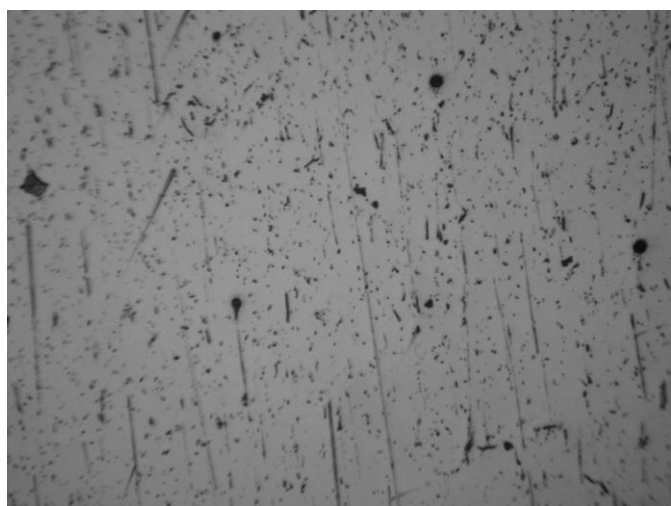


Рис. 2. Фото шлифа с наименьшей пористостью (0,5%)

На рис. 3 представлено фото шлифа, характеризующего высокой пористостью (11,1%). При сплавлении данного образца был использован следующий режим: мощность ла-

зера – 100 Вт, расстояние между последовательно сплавляемыми точками – 200 мкм, ширина штриха – 150 мкм. Мощность лазера в данном случае достаточна для плавления порошка титанового сплава, который характеризуется высокой поглотительной способностью лазерного излучения [22] и низкой теплопроводностью. Однако, полученная ванна расплава слишком мала при используемой ширине штриха и расстоянии между соседними сплавляемыми точками.



Рис. 3. Фото шлифа с пористостью 11,2%

Процесс селективного лазерного сплавления определяется большим количеством параметров. Для упрощения анализа процесса исследователи часто используют комплексный параметр – объемную плотность энергии (volumetric energy density (VED):

$$E_v = P \cdot ET / (HS \cdot PD \cdot LT), \quad (1)$$

где P – мощность лазера; ET – время сплавления одной точки; HS – ширина штриха; PD – расстояние между последовательно сплавляемыми точками; LT – толщина слоя.

На рис. 4 представлен график зависимости относительной плотности материала от объемной плотности энергии.

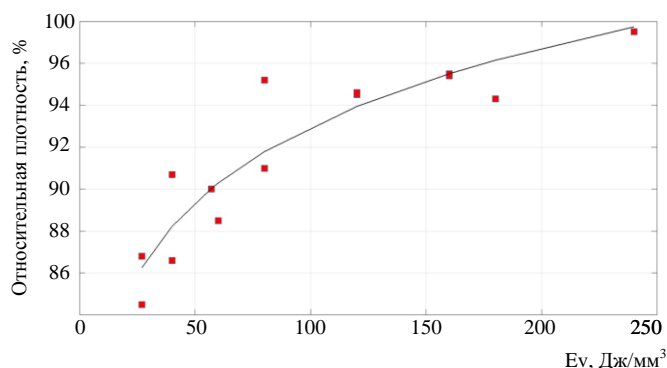


Рис. 4. Зависимость относительной плотности материала от объемной плотности энергии

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о том, что в производстве деталей из сплава TiAl6V4 методом селективного лазерного сплавления (при использовании углекислотного лазера) следует применять режим, характеризующийся величиной объемной плотности энергии не менее 160 Дж/мм³.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследовалось влияние параметров процесса селективного лазерного сплавления порошка титанового сплава TiAl6V4 на пористость получаемого материала. При определении пористости полученных образцов применялся метод исследования шлифа на оптическом микроскопе. С использованием различных режимов сплавления были изготовлены образцы с размерами 10×10×5 мм. Определено, что в производстве деталей из сплава TiAl6V4 методом селективного лазерного сплавления следует применять режим, характеризуемый величиной объемной плотности энергии не менее 160 Дж/мм³. Минимальная полученная пористость – 0,5%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wagner S.M. Additive manufacturing's impact and future in the aviation industry / S.M. Wagner, R.O. Walton // *Prod. Plan. Control.* – 2016. – vol. 27, is. 13. – P. 1124-1130. DOI: 10.1080/09537287.2016.1199824
2. Additive Manufacturing of Titanium Alloy for Aircraft Components / E. Uhlmann, R. Kersting, T.B. Klein et al. // *Procedia CIRP.* – 2015. – vol. 35. – P. 55-60. DOI: 10.1016/j.procir.2015.08.061
3. Additively manufactured porous tantalum implants / R. Wauthle, J. van der Stok, S. Amin Yavari, J. Van Humbeeck et al. // *Acta Biomater.* – 2015. – vol. 14. – P. 217-225. DOI: 10.1016/j.actbio.2014.12.003
4. In vivo implantation of porous titanium alloy implants coated with magnesium-doped octacalcium phosphate and hydroxyapatite thin films using pulsed laser deposition / W. Mroz, B. Budner, R. Syroka et al. // *J. Biomed. Mater. Res. - Part B Appl. Biomater.* – 2015. – vol. 103, is. 1. – P. 151-158. DOI: 10.1002/jbm.b.33170
5. A comparison of biocompatibility of a titanium alloy fabricated by electron beam melting and selective laser melting / H. Wang, B. Zhao, C. Liu et al. // *PLoS One.* – 2016. – vol. 11, is. 7. DOI: 10.1371/journal.pone.0158513
6. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms / D.D. Gu, W. Meiners, K. Wissenbach, R. Poprawe // *International Materials Reviews.* – 2012. – vol. 57, is. 3. – P. 133-164. DOI: 10.1179/1743280411Y.0000000014
7. Influence of porosity on mechanical properties and in vivo response of Ti6Al4V implants / A. Bandyopadhyay, F. Espana, V.K. Balla et al. // *Acta Biomaterialia.* – 2010. – vol. 6, is 4. – P. 1640-1648. DOI: 10.1016/j.actbio.2009.11.011
8. A study of the micro structural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V / L. Thijs, F. Verhaeghe, T. Craeghs et al. // *Acta Materialia.* – 2010. – vol. 58, is 9. – P. 3303-3312. DOI: 10.1016/j.actamat.2010.02.004
9. Ductility of a Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting of prealloyed powders / L. Facchini, E. Magalini, P. Robotti et al. // *Rapid Prototyping Journal.* – 2010. – vol. 16, is 6. – P. 450-459. DOI: 10.1108/13552541011083371
10. Process parameter selection for selective laser melting of Ti6Al4V based on temperature distribution simulation and experimental sintering / B.B. Song, S. Dong, H. Liao, C. Coddet // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2012. – vol. 61, is. 9-12. – P. 967-974. DOI: 10.1007/s00170-011-3776-6

11. Sun J. Mechanical properties of Ti-6Al-4V octahedral porous material unit formed by selective laser melting / J. Sun, Y. Yang, D. Wang // *Advances in Mechanical Engineering.* – 2012. – vol. 2012. – 11 p. DOI: 10.1155/2012/427386

12. Analysis of Fracture Toughness and Crack Propagation of Ti6Al4V Produced by Selective Laser Melting / B. Van Hooreweder, D. Moens, R. Boonen et al. // *Adv. Eng. Mater.* – 2012. – vol. 14, is. 1-2. – P. 92-97. DOI: 10.1002/adem.201100233

13. On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance / S. Leuders, M. Thöne, A. Riemer et al. // *International Journal of Fatigue.* – 2013. – vol. 48. – P. 300-307. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2012.11.011

14. Microstructure and Tensile Properties of Ti-6Al-4V Alloys Fabricated by Selective Laser Melting / H.X. Li, B.Y. Huang, F. Sun, S.L. Gong // *Rare Met. Mater. Eng.* – 2013. – vol. 42. – P. 209-212.

15. Sun J. Parametric optimization of selective laser melting for forming Ti6Al4V samples by Taguchi method / J. Sun, Y. Yang, D. Wang // *Optics & Laser Technology.* – 2013. – vol. 49. – P. 118-124. DOI: 10.1016/j.optlastec.2012.12.002

16. Analysis of defect generation in Ti-6Al-4V parts made using powder bed fusion additive manufacturing processes / H. Gong, K. Rafi, H. Gu et al. // *Additive Manufacturing.* – 2014. – vol. 1. – P. 87-98. DOI: 10.1016/j.addma.2014.08.002

17. Dhansay N.M. Fatigue and Fracture Toughness of Ti-6Al-4V Titanium Alloy Manufactured by Selective Laser Melting / N.M. Dhansay, R. Tait, T. Becker // *Adv. Mater. Res.* – 2014. vol. 1019. – P. 248-253. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1019.248

18. Predictive models for physical and mechanical properties of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting / F. Bartolomeu, S. Faria, O. Carvalho et al. // *Materials Science and Engineering: A* – 2016. – vol. 663. – P. 181-192. DOI: 10.1016/j.msea.2016.03.113

19. Formation and control of martensite in Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting / J. Yang, H. Yu, J. Yin et al. // *Mater. Des.* – 2016. – vol. 108. – P. 308-318. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.06.117

20. Spierings A.B. Comparison of density measurement techniques for additive manufactured metallic parts / A.B. Spierings, M. Schneider, R. Eggenberger // *Rapid Prototyp. J.* – 2011. – vol. 17, is. 5. – P. 380-386. DOI: 10.1108/13552541111156504

21. Vilaro T. As-fabricated and heat-treated microstructures of the Ti-6Al-4V alloy processed by selective laser melting / T. Vilaro, C. Colin, J.D. Bartout // *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.* 2011. – vol. 42, is. 10. – P. 3190-3199. DOI: 10.1007/s11661-011-0731-y

22. Tolochko N.K. Absorbance of powder materials suitable for laser sintering / N.K. Tolochko, T. Laoui, Y.V. Khlopkov et al. // *Rapid Prototyp. J.* – 2000. – vol. 6, is 3. – P. 155-160. DOI: 10.1108/13552540010337029

Influence of Selective Laser Melting Process Parameters on Porosity of TiAl6V4 Alloy

Baitimerov R.M., Radionova L.V.

South Ural State University (national research university)
Chelyabinsk, Russian Federation
baitimerovrm@susu.ru, radionovalv@susu.ru

Safonov E.V.

Moscow Polytechnic University
Moscow, Russian Federation
e.v.safonov@mospolytech.ru

Abstract. In this research TiAl6V4 titanium base alloy was used for Selective Laser Melting (SLM). This alloy is widely used in aerospace and medical industries. For determination of influence of SLM process parameters on TiAl6V4 10x10x5 mm specimens were fabricated by using different SLM process parameters. The porosity of fabricated specimens was determined by microscopy analysis of cross-sections. The lowest porosity that was achieved is about of 0.5%.

Keywords: selective laser melting, powder metallurgy, porosity, titanium alloy, TiAl6V4.

REFERENCES

1. Wagner S.M., Walton R.O. Additive manufacturing's impact and future in the aviation industry, *Prod. Plan. Control*, 2016, vol. 27, is. 13, pp. 1124-1130. DOI: 10.1080/09537287.2016.1199824
2. Uhlmann E., Kersting R., Klein T.B. et al. Additive Manufacturing of Titanium Alloy for Aircraft Components, *Procedia CIRP*, 2015, vol. 35, pp. 55-60. DOI: 10.1016/j.procir.2015.08.061
3. Wauthle R., J. van der Stok, Amin Yavari S. et al. Additively manufactured porous tantalum implants, *Acta Biomater*, 2015, vol. 14, pp. 217-225. DOI: 10.1016/j.actbio.2014.12.003
4. Mroz W., Budner B., Syroka R. et al. In vivo implantation of porous titanium alloy implants coated with magnesium-doped octacalcium phosphate and hydroxyapatite thin films using pulsed laser deposition, *J. Biomed. Mater. Res. - Part B Appl. Biomater*, 2015, vol. 103, is. 1, pp. 151-158. DOI: 10.1002/jbm.b.33170
5. Wang H., Zhao B., Liu C. A comparison of biocompatibility of a titanium alloy fabricated by electron beam melting and selective laser melting, *PLoS One*, 2016, vol. 11, is. 7. DOI: 10.1371/journal.pone.0158513
6. Gu D.D., Meiners W., Wissenbach K. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms, *International Materials Reviews*, 2012, vol. 57, is. 3, pp. 133-164. DOI: 10.1179/1743280411Y.0000000014
7. Bandyopadhyay A., Espana F., Balla V.K. et al. Influence of porosity on mechanical properties and in vivo response of Ti6Al4V implants, *Acta Biomaterialia*, 2010, vol. 6, is 4, pp. 1640-1648. DOI: 10.1016/j.actbio.2009.11.011
8. Thijs L., Verhaeghe F., Craeghs T. et al. A study of the micro structural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V, *Acta Materialia*, 2010, vol. 58, is 9, pp. 3303-3312. DOI: 10.1016/j.actamat.2010.02.004
9. Facchini L., Magalini E., Robotti P. et al. Ductility of a Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting of prealloyed powders, *Rapid Prototyping Journal*, 2010, vol. 16, is 6, pp. 450-459. DOI: 10.1108/13552541011083371
10. Song B.B., Dong S., Liao H., Coddet C. Process parameter selection for selective laser melting of Ti6Al4V based on temperature distribution simulation and experimental sintering, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, vol. 61, is. 9-12, pp. 967-974. DOI: 10.1007/s00170-011-3776-6
11. Sun J., Yang Y., Wang D. Mechanical properties of Ti-6Al-4V octahedral porous material unit formed by selective laser melting, *Advances in Mechanical Engineering*, 2012, vol. 2012, 11 p. DOI: 10.1155/2012/427386
12. Van Hooreweder B., Moens D., Boonen R. et al. Analysis of Fracture Toughness and Crack Propagation of Ti6Al4V Produced by Selective Laser Melting, *Adv. Eng. Mater.*, 2012, vol. 14, is. 1-2, pp. 92-97. DOI: 10.1002/adem.201100233
13. Leuders S., Thöne M., Riemer A. et al. On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance, *International Journal of Fatigue*, 2013, vol. 48, pp. 300-307. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2012.11.011
14. Li H.X., Huang B.Y., Sun F., Gong S.L. Microstructure and Tensile Properties of Ti-6Al-4V Alloys Fabricated by Selective Laser Melting, *Rare Met. Mater. Eng.*, 2013, vol. 42, pp. 209-212.
15. Sun J., Yang Y., Wang D. Parametric optimization of selective laser melting for forming Ti6Al4V samples by Taguchi method, *Optics & Laser Technology*, 2013, vol. 49, pp. 118-124. DOI: 10.1016/j.optlastec.2012.12.002
16. Gong H., Rafi K., Gu H. et al. Analysis of defect generation in Ti-6Al-4V parts made using powder bed fusion additive manufacturing processes, *Additive Manufacturing*, 2014, vol. 1, pp. 87-98. DOI: 10.1016/j.addma.2014.08.002
17. Dhansay N.M., Tait R., Becker T. Fatigue and Fracture Toughness of Ti-6Al-4V Titanium Alloy Manufactured by Selective Laser Melting, *Adv. Mater. Res.*, 2014, vol. 1019, pp. 248-253. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1019.248
18. Bartolomeu F., Faria S., Carvalho O. et al. Predictive models for physical and mechanical properties of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting, *Materials Science and Engineering: A*, 2016, vol. 663, pp. 181-192. DOI: 10.1016/j.msea.2016.03.113
19. Yang J., Yu H., Yin J. et al. Formation and control of martensite in Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting, *Mater. Des.*, 2016, vol. 108, pp. 308-318. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.06.117

20. Spierings A.B., Schneider M., Eggenberger R. Comparison of density measurement techniques for additive manufactured metallic parts, *Rapid Prototyp. J.*, 2011, vol. 17, is. 5, pp. 380-386. DOI: 10.1108/13552541111156504

21. Vilaro T., Colin C., Bartout J.D. As-fabricated and heat-treated microstructures of the Ti-6Al-4V alloy processed by selective laser melting, *Metall. Mater. Trans. A Phys.*

Metall. Mater. Sci., 2011, vol. 42, is. 10, pp. 3190-3199. DOI: 10.1007/s11661-011-0731-y

22. Tolochko N.K., Laoui T., Khlopkov Y.V, et al. Absorptance of powder materials suitable for laser sintering, *Rapid Prototyp. J.*, 2000, vol. 6, is 3, pp. 155-160. DOI: 10.1108/13552540010337029

Библиографическое описание статьи

Байтимеров Р.М. Влияние параметров селективного лазерного сплавления на пористость образцов из сплава TiAl6V4 / Р.М. Байтимеров, Л.В. Радионова, Е.В. Сафонов // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал.* – 2017. – Т.5, №4. – С. 41-45. DOI: 10.24892/RIJE/20170405

Reference to article

Baitimerov R.M., Radionova L.V., Safonov E.V. Influence of selective laser melting process parameters on porosity of TiAl6V4 alloy, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2017, vol.5, no.4, pp. 41-45. DOI: 10.24892/RIJE/20170405
