

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Научная статья
УДК 621.762:620.186
DOI: 10.34759/vst-2023-2-196-203

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6 ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КРЫЛЬЧАТКИ КОМПРЕССОРА МАЛОРАЗМЕРНОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ МЕТОДАМИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Мария Олеговна Дмитриева¹ ✉, Алексей Александрович Мельников², Екатерина Александровна Носова³,
Рустам Равильевич Кяримов⁴, Георгий Евгеньевич Кржевицкий⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева
(Самарский университет),

Самара, Россия

¹ mdmitr1ewa@yandex.ru ✉

² melnickov.alex@yandex.ru

³ eanosova@mail.ru

⁴ rustam9395@mail.ru

⁵ krzhevitskiy2016@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена изучению формирования микроструктуры титанового сплава ВТ6 в процессе изготовления крыльчатки компрессора малоразмерного ГТД методом селективного лазерного сплавления. Исследования проводились на образцах, выращенных вертикально и горизонтально к платформе построения. Исследована микроструктура, проведены электронно-микроскопические и рентгеноспектральные исследования материала ВТ6. Определены механические свойства образцов после селективного лазерного сплавления. Проанализирован механизм разрушения образцов в процессе испытания на растяжение.

Ключевые слова: титановый сплав, микроструктура, селективное лазерное сплавление, электронная микроскопия, фрактография, крыльчатка

Для цитирования: Дмитриева М.О., Мельников А.А., Носова Е.А., Кяримов Р.Р., Кржевицкий Г.Е. Исследование формирования микроструктуры титанового сплава ВТ6 при изготовлении крыльчатки компрессора малоразмерного газотурбинного двигателя методами аддитивных технологий // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 2. С. 196–203. DOI: 10.34759/vst-2023-2-196-203

METALLURGY AND MATERIAL SCIENCE

Original article

STUDYING THE VT6 TITANIUM ALLOY MICROSTRUCTURE FORMING WHILE COMPRESSOR IMPELLER MANUFACTURING OF THE SMALL-SIZED GAS TURBINE ENGINE BY ADDITIVE TECHNOLOGIES METHODS

Mariya O. Dmitrieva¹ ✉, Aleksei A. Mel'nikov², Ekaterina A. Nosova³, Rustam R. Kyarimov⁴, Georgii E. Krzhevitskii⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev (Samara University),

Samara, Russia

¹ mdmitr1ewa@yandex.ru ✉

² melnickov.alex@yandex.ru

³ eanosova@mail.ru

⁴ rustam9395@mail.ru

⁵ krzhevitskiy2016@mail.ru

© Дмитриева М.О., Мельников А.А., Носова Е.А., Кяримов Р.Р., Кржевицкий Г.Е., 2023

Abstract

Selective Laser Melting (SLM) represents an additive manufacturing technology meant for metal powders alloyage by a high-power laser. Powder materials application ensures more uniform chemical composition over the product section and the absence of zonal segregation. Titanium alloy powders application for selective laser melting is a prospective trend in additive manufacturing.

The possibility of the parts production with configuration of any complexity, simultaneous growth of several samples, high material utilization coefficient and products prototyping simplification are among the SLM technology benefits. The presence of residual porosity in the part being manufactured, limitation of used materials and laser radiation sources, as well as the size of the products being manufactured are related to the said technology drawbacks.

The purpose of the article consists in studying the Ti6Al4V alloy microstructure forming while manufacturing the gas turbine engine compressor impeller by the selective laser melting method.

The samples for studying were fabricated with the installation for the SLM 280 HL metal powder selective laser melting installation. They were synthesized both horizontally and vertically relative to the building-up platform. The microstructure studying after etching was performed with the METAM LV-31 metallographic microscope. Electron-microscopic analysis of the samples and original powder substance was conducted with the TESCAN Vega SB scanning electron microscope. Chemical composition of the original powder material was determined with the INCAx-Act Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) device. EDS analysis revealed that the original titanium alloy powder chemical composition corresponds to the standard with an excess of aluminum and silicon content. The electron-microscopic analysis results revealed the spherical shape of the powder particles peculiar to the method of obtaining the melt dispersion. Metallographic analysis demonstrated that after the SLM the samples had a microstructure of the α -phase plates, and the β -phase was not noticed. The electron microscopic analysis of samples fractures after the tensile testing revealed the mixed character of the fracture mechanism. The non-uniform fracture contains the sections corresponding to various stages of destruction.

The ultimate strength of the samples after the SLM is 1117 MPa. It is more than ultimate resistance of stamped material. Relative elongation of the vertical sample is 3.08 percent. Relative elongation of the horizontal sample is 6.11 percent. It is less than ultimate resistance of stamped material.

Keywords: titanium alloy, microstructure, selective laser melting, electron microscopy, fractography, impeller

For citation: Dmitrieva M.O., Mel'nikov A.A., Nosova E.A., Kyarimov R.R., Krzhevitskii G.E. Studying the VT6 Titanium Alloy Microstructure Forming while Compressor Impeller Manufacturing of the Small-Sized Gas Turbine Engine by Additive Technologies Methods. *Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 2, pp. 196-203. DOI: 10.34759/vst-2023-2-196-203

Введение

Сплавы на основе титана широко применяются во многих отраслях промышленности, в том числе в авиационной и ракетно-космической [1–5]. Титановые сплавы немагнитны и обладают высокой удельной прочностью, коррозионной стойкостью и жаропрочностью при температурах до 500–600°C. Применение титановых сплавов благодаря их малой плотности обеспечивает значительную экономию в весе конструкций. Основными легирующими элементами в титановых сплавах являются Al, Cr, Mo, V, Mn и Sn; легирование позволяет повысить прочность, жаропрочность и коррозионную стойкость [6–10].

Титановый сплав ВТ6 принадлежит к сплавам системы Ti-Al-V, наиболее важной тройной системы, лежащей в основе большинства промышленных титановых сплавов общего назначения. Алюминий в данном случае обеспечивает высокую прочность и жаропрочность, а ванадий помимо этого повышает пластичность [11]. Из-за превосходного сочетания механических и технологических свойств сплав ВТ6 подходит для изготовления лопаток газотурбинных двигателей (ГТД). Хорошая свариваемость этого сплава делает его применение актуальным в форме порошкового материала для производства деталей методом селективного лазерного сплавления (SLM – Selective Laser Melting).

Селективное лазерное сплавление является одним из методов «порошковых» аддитивных технологий и заключается в послойном построении детали на металлической подложке путем сплавления отдельных гранул порошка между собой с помощью лазерного излучения высокой мощности. Технология SLM имеет следующие преимущества: возможность изготовления изделий сложной геометрической формы, снижение веса за счет применения ячеистых структур, одновременное изготовление нескольких деталей, высокий коэффициент использования материала, упрощение прототипирования и возможность кастомизации изделий [12–13]. К недостаткам данной технологии относят: наличие остаточной пористости в структуре изготовленной детали, проблему обеспечения необходимой микроструктуры, остаточные напряжения в результате усадки при кристаллизации детали, ограничения источников лазерного излучения, габаритов создаваемых изделий и используемых материалов [14–15].

Можно выделить четыре основных этапа изготовления детали методом SLM: 1) разработка и построение CAD-модели будущего изделия; 2) формирование управляющей программы для SLM-установки и назначение режимов селективного лазерного сплавления; 3) непосредственно выращивание изделия на установке для селективного лазерного сплавления; 4) постобработка готового изделия. При этом каждый

этап влияет на качество конечного продукта [16]. Немаловажным является процесс подбора параметров процесса SLM – мощности лазерного излучения, скорости сканирования, шага сканирования.

Особое внимание уделяется качеству применяемого исходного порошкового материала. Металлические порошки титановых сплавов для применения в SLM производятся и поставляются многими компаниями в России. Из-за различных особенностей производства порошок одного и того же химического состава, соответствующего заданному сплаву, у разных производителей или в разных партиях может отличаться по гранулометрическому составу, сыпучести и морфологии гранул. Данные параметры исходного порошкового материала определяют теплофизические свойства формируемого в процессе SLM порошкового слоя и, как следствие, оказывают значительное влияние на микроструктуру, механические свойства и качество поверхности готового изделия. Необходимо тщательно подбирать исходный порошковый материал для получения качественных деталей с высокими свойствами, отвечающими требованиям по надежности и ресурсу изделия [17–18].

В процессе SLM происходит мгновенный нагрев и охлаждение металла, что может вызывать формирование нежелательной микроструктуры материала, спровоцировать появление остаточных напряжений в результате усадки при кристаллизации и, как следствие, вызвать коробление детали. Формируемая микроструктура также существенно влияет на механические свойства и качество готового изделия, поэтому проблема обеспечения необходимой микроструктуры металла при изготовлении деталей методом SLM является актуальной задачей для исследователей, работающих в области материаловедения и аддитивных технологий.

Анализ российских и зарубежных публикаций за последние пять лет показывает рост интереса исследователей к проблеме формирования микроструктуры титанового сплава системы Ti-Al-V в процессе селективного лазерного сплавления. В работах зарубежных научных коллективов описываются микроструктурные особенности титанового сплава, проявляемые при различных режимах сплавления, исследуется взаимосвязь между структурой и механическими свойствами материала, приводится сравнение свойств материала после SLM и материала, полученного по традиционной технологии [19–20]. В работах российских исследователей также рассматриваются возможные дефекты структуры в виде несплошностей и несплавлений, возникающих в процессе SLM, и возможные методы их устранения [21–23].

Цель данного исследования заключается в изучении формирования микроструктуры титанового сплава VT6 в процессе изготовления крыльчатки компрессора ГТД методом селективного лазерного сплавления. Основными задачами исследования являются: изучение морфологии исходного порошкового материала, анализ микроструктуры образцов после процесса SLM,

анализ поверхности изломов образцов после испытаний на растяжение.

Методика проведения исследований

Изготовление крыльчатки компрессора малоразмерного ГТД и исследуемых образцов производилось на аддитивной установке SLM 280HL компании SLM Solutions. Данная установка оснащена лазером мощностью 400 Вт, размеры области построения (длина × ширина × высота) составляют 280 × 280 × 365 мм³.

Начальный этап изготовления заготовки крыльчатки компрессора малоразмерного ГТД включал в себя построение трехмерной модели и анализ ее конструктивных особенностей (рис. 1).

Подробно разработка технологического процесса изготовления данного изделия представлена в статье [24].

Чтобы изучить формирование микроструктуры титанового сплава VT6 в процессе изготовления крыльчатки компрессора ГТД методом селективного лазерного сплавления, были изготовлены контрольные образцы перпендикулярно к плоскости платформы построения (вертикально) и в плоскости платформы построения под углом 90 градусов относительно дозатора порошка (горизонтально). На образцах после SLM для исследования механических свойств проводились испытания на растяжение, после чего из них изготавливались шлифы в продольном и поперечном сечении на автоматической шлифовально-полировальной машине REMET LS250A (рис. 2).

Исследования микроструктуры после химического травления с помощью раствора плавиковой и азотной кислоты проводились на металлографическом микро-



Рис. 1. Трехмерная модель крыльчатки компрессора малоразмерного ГТД



Рис. 2. Исследуемые контрольные образцы

скопе МЕТАМ ЛВ-31. Электронно-микроскопические исследования образцов и исходного порошкового материала проводились на растровом электронном микроскопе TESCAN Vega SB. Химический состав исходного порошкового материала определялся с помощью микрорентгеноспектральной приставки к микроскопу INCAx-Act [25].

Результаты исследований

Микрорентгеноспектральный анализ показал, что химический состав исходного порошкового материала соответствует титановому сплаву ВТ6 по ГОСТ 19807-91 с незначительным превышением содержания алюминия и кремния (табл. 1).

Электронно-микроскопический анализ исходного материала показал, что частицы порошка имеют сферическую форму, характерную для метода получения газовой атомизацией [26–27]. На поверхности частиц наблюдается рельеф, указывающий на характерное

для литого материала дендритное строение (рис. 3,а). В некоторых случаях наблюдается налипание мелких частиц на более крупные гранулы, так называемые сателлиты, а также наложение одной гранулы на другую – «аморфный панцирь» (рис. 3,б). Наличие таких частиц не влияет на качество конечного изделия, так как они отсеиваются на ситах перед сплавлением.

Микроструктура травленных образцов в продольном и поперечном сечении представлена на рис. 4 и 5. Металлографический анализ показал, что образцы после SLM имеют пластинчатую микроструктуру, характерную для сплава ВТ6. При этом наблюдается разупорядоченное расположение пластин α -фазы; β -фаза не просматривается. Переход между зернами характеризуется резкой переориентацией пластин α -фазы.

Микроструктура поперечного сечения образца (рис. 4,а), выращенного вертикально, характеризуется более мелкозернистой структурой в сравнении с образцом, выращенным горизонтально (рис. 4,б), об

Таблица 1

Результаты химического анализа исходного порошкового материала

Образец	Содержание элемента, % масс					
	Ti	Al	V	Zr	Si	Fe
Исследуемый порошковый материал	88,21	6,85	4,60	0,03	0,19	0,12
Титановый сплав ВТ6 по ГОСТ 19807-91	основа	5,30–6,80	3,50–5,30	до 0,30	до 0,10	до 0,60

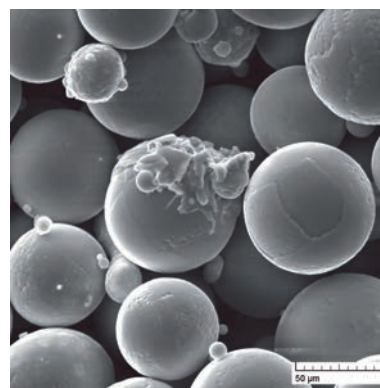
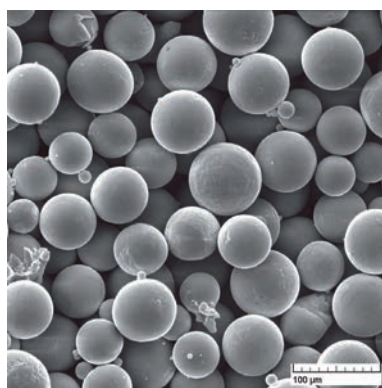
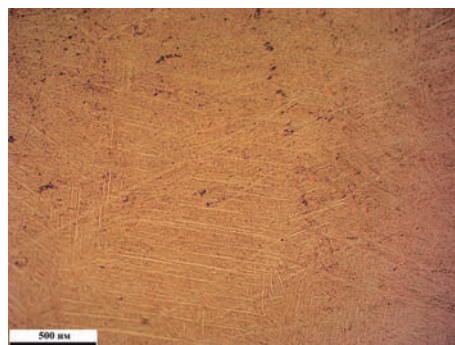
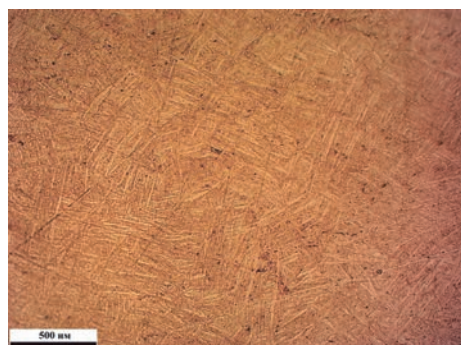


Рис. 3. Частицы порошка ВТ6: а – внешний вид; б – дефектные частицы



а

б

Рис. 4. Микроструктура поперечного сечения образца, выращенного вертикально (а) и горизонтально (б)

этом свидетельствует меньший размер пластин α -фазы в первом случае.

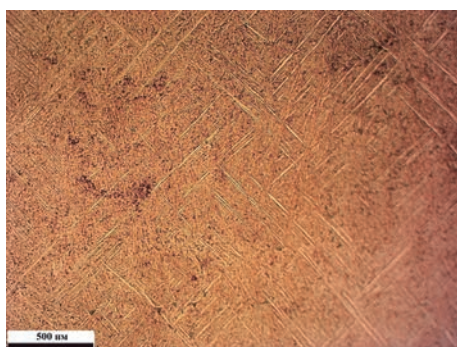
Микроструктура продольного сечения образца, выращенного вертикально (рис. 5,а), отличается от остальных наличием вытянутых пересекающихся пластин α -фазы. В микроструктуре продольного сечения образца, выращенного горизонтально (рис. 5,б), наблюдаются разупорядоченные вытянутые пластины α -фазы.

Электронно-микроскопический анализ изломов образцов после испытания на растяжение показал, что механизм разрушения носит смешанный характер (рис. 6,а). На боковой поверхности образцов после механической обработки имеются риски (рис. 6,б), являющиеся

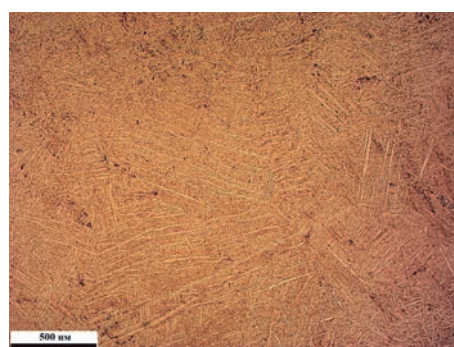
концентраторами напряжений, которые инициируют появление трещин в процессе растяжения. Поверхность излома неоднородная; наблюдаются участки, соответствующие различным стадиям разрушения.

На поверхности излома образца, выращенного вертикально, наблюдаются зоны ямочного микрорельефа и присутствуют локальные несплавления, оказывающие влияние на механические характеристики, в частности относительное удлинение (рис. 7,а). На поверхности излома образца, выращенного горизонтально, наблюдаются единичные микропоры; рельеф характеризует смешанный механизм разрушения (рис. 7,б).

Механические свойства образцов после SLM представлены в табл. 2.

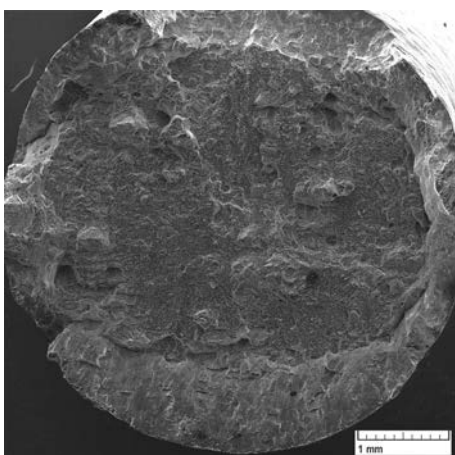


а

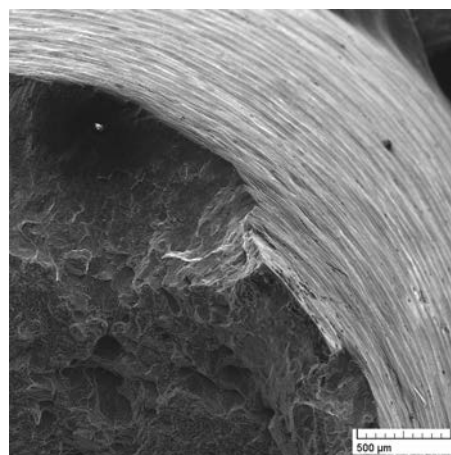


б

Рис. 5. Микроструктура продольного сечения образца, выращенного вертикально (а) и горизонтально (б)



а



б

Рис. 6. Излом после испытания на растяжение (РЭМ): общий вид (а), боковая поверхность (б)

Таблица 2

Механические свойства образцов после SLM

Образец	Механические свойства ($T=20^{\circ}\text{C}$)		
	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %
SLM, вертикальное выращивание	1017,56	1091,30	3,08
SLM, горизонтальное выращивание	1087,37	1142,74	6,11
Штамповка (ОСТ I 90000-70)	—	990,00	10,00

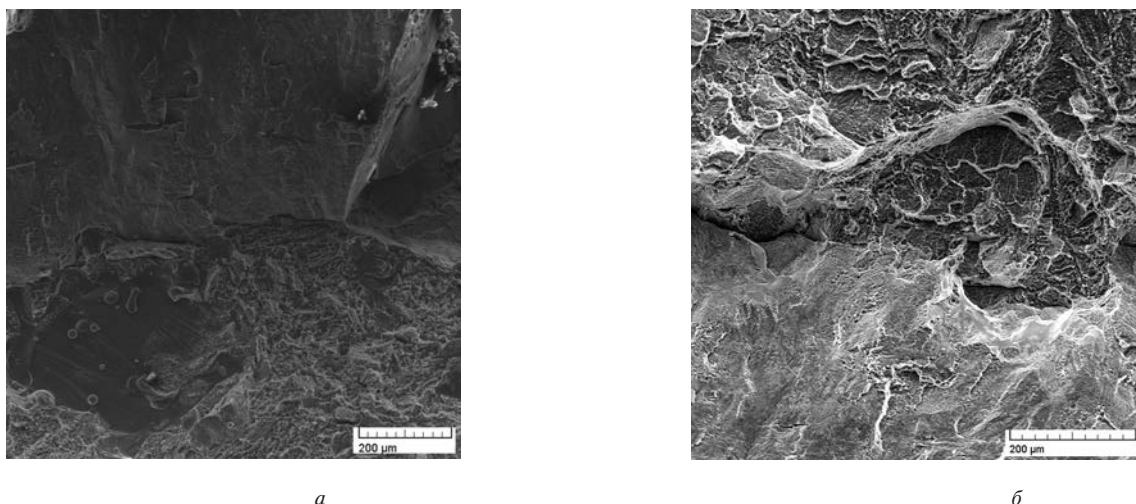


Рис. 7. Поверхности изломов образцов: выращенного вертикально (а) и горизонтально (б)

Величина относительного удлинения образца, выращенного горизонтально, практически в два раза выше, чем у образца, выращенного вертикально. Такое различие свойств объясняется наличием в структуре вертикально выращенного образца локальных зон несплавления.

Из полученных данных механических испытаний следует, что предел прочности материала, полученного методом селективного лазерного сплавления, выше, чем у материала, полученного штамповкой; относительное удлинение материала после SLM ниже, чем у штампованного.

Выводы

В результате исследования изучено формирование микроструктуры титанового сплава ВТ6 в процессе изготовления крыльчатки компрессора ГТД методом селективного лазерного сплавления на примере образцов, выращенных вертикально и горизонтально относительно платформы построения.

Показано, что частицы порошка имеют сферическую форму, характерную для метода получения диспергированием расплава. Металлографический анализ показал, что образцы после SLM имеют пластинчатую микроструктуру, характерную для сплава ВТ6; наблюдается разупорядоченное расположение пластин α -фазы, β -фаза не просматривается. Мелкое зерно наблюдается в микроструктуре поперечного сечения образца, выращенного вертикально. Это можно объяснить более высокой скоростью охлаждения в зоне сплавления материала.

Электронно-микроскопический анализ излома после испытания на растяжение показал, что разрушение носит смешанный характер. На поверхности изломов обоих образцов наблюдается наличие ямочного микрорельефа, характерного для вязкого разрушения. Поверхность излома образца, выращенного вертикально, содержит локальные непролавы, оказывающие влияние на величину относительного удлинения.

Механические испытания образцов показали, что титановый сплав ВТ6 после селективного лазерного

сплавления имеет предел прочности порядка 1117 МПа, что выше, чем у материала, полученного штамповкой. Относительное удлинение материала после SLM ниже, чем у штампованного. Величина относительного удлинения образца, выращенного горизонтально, практически в два раза выше, чем у образца, выращенного вертикально, что объясняется наличием локальных непролавы в структуре вертикально выращенного образца.

Полученные результаты исследования позволили определить режимы, обеспечивающие максимальные прочностные характеристики при изготовлении крыльчатки малоразмерного ГТД по технологии селективного лазерного сплавления.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Разработки ВИАМ для газотурбинных двигателей и установок // Крылья Родины. 2010. № 4. С. 31–33.
2. Сомонов В.В. Прямое лазерное выращивание из титановых сплавов: сравнение методов получения изделий из порошка и проволоки // Технические науки: проблемы и перспективы: Сб. статей VI Международной научной конференции (Санкт-Петербург, 2018). – СПб.: Свое издательство, 2018. С. 44–50.
3. Ni Ch., Zhu L., Zheng Zh., et al. Effect of material anisotropy on ultra-precision machining of Ti-6Al-4V alloy fabricated by selective laser melting // Journal of Alloys and Compounds. 2020. Vol. 848, 156457. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.156457
4. Гарибов Г.С. Металлургия гранул – основа создания новых материалов для перспективных авиадвигателей // Пермские авиационные двигатели. 2012. № 26. С. 58–63.
5. Chang K., Liang E., Huang W., et al. Microstructural feature and mechanical property in different building directions of additive manufactured Ti6Al4V alloy // Materials Letters. 2020. Vol. 267, 127516. DOI: 10.1016/j.matlet.2020.127516
6. Глуштенко С.Ф., Первышин А.Н. Формирование структуры и свойств титановых сплавов по механическим свойствам в процессах обработки металлов давлением // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2011. № 1 (25). С. 110–119.
7. Павлович С.П., Мысик Р.К., Бакерин С.В., Брусницын С.В., Сулицин А.В. Исследование структуры и механических свойств

- литых лопаток турбины низкого давления из интерметаллидного титанового сплава // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2014. Т. 1. № 4-1(20). С. 62–69.
8. Колесников А.В., Михайлов И.В. Пневмотермическая формовка деталей и многослойных конструкций авиакосмической техники из титанового сплава VT20 // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 1. С. 244–250.
9. Солдатенко И.В. К вопросу о контроле качества полуфабрикатов из титановых сплавов // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 4. С. 189–194.
10. Муравьев В.И., Бахматов П.В., Григорьев В.В. Особенности образования специфических дефектов при сборке крупногабаритных титановых конструкций летательных аппаратов // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 4. С. 17–27. DOI: 10.34759/vst-2019-4-17-27
11. Song J., Han Y., Fang M., et al. Temperature sensitivity of mechanical properties and microstructure during moderate temperature deformation of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy // Materials Characterization. 2020. Vol. 165, 110342. DOI: 10.1016/j.matchar.2020.110342
12. Caia Ch., Wua X., Liub W., Zhua W., Chenc H., Chua Dong Quid J., Sund Ch-N., Liua J., Weia Q., Shia Y. Selective laser melting of near- α titanium alloy Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V: Parameter optimization, heat treatment and mechanical performance // Journal of Materials Science & Technology. 2020. Vol 57, pp. 51-64. DOI: 10.1016/j.jmst.2020.05.004
13. Gu D.D., Meiners W., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser Additive Manufacturing of Metallic Components: Materials, Processes and Mechanisms // International Materials Reviews. 2012. Vol. 57. No. 3, pp. 137-164. DOI: 10.1179/1743280411Y.0000000014
14. Waddell M., Walker K., Bandyopadhyay R., et al. Small fatigue crack growth behavior of Ti-6Al-4V produced via selective laser melting: In situ characterization of a 3D crack tip interactions with defects // International Journal of Fatigue. 2020. Vol. 137, 105638. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105638
15. Lu P., Wu M., Liu X., Duan W., Han J. Study on Corrosion Resistance and Bio-Tribological Behavior of Porous Structure Based on the SLM Manufactured Medical Ti6Al4V // Metals and Materials International. 2020. Vol. 26, pp. 1182-1191. DOI: 10.1007/s12540-019-00506-w
16. Балякин А.В., Жученко Е.И., Смирнов Г.В., Проничев Н.Д. Исследование проблем появления негативной технологической наследственности при изготовлении деталей ГТД методом селективного лазерного сплавления // Известия Самарского научного центра РАН. 2019. Т. 21. № 1. С. 61–70.
17. Keaveney S., Shmeliov A., Nicolosi V., Dowling P.D. Investigation of process by-products during the Selective Laser Melting of Ti6Al4V powder // Additive Manufacturing. 2020. Vol. 36, 101514. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101514
18. Gu H., Gong H., Dilip J.J.S. et al. Effects of powder variation on the microstructure and tensile strength of Ti6Al4V parts fabricated by selective laser melting // 25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium (4-6 August 2014; University of Texas Libraries at Austin), pp. 470-483.
19. Yan Q., Chen B., Kang N. et al. Comparison study on microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloys fabricated by powder-based selective-laser-melting and sintering methods // Materials Characterization. 2020. Vol. 164: 110358. DOI: 10.1016/j.matchar.2020.110358
20. Liu S., Shin Y.C. Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review // Materials & Design. 2019. Vol. 164: 107552. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.107552
21. Каплан М.А., Смирнов М.А., Кирсанкин А.А., Севостьянов М.А. Свойства изделий из титанового сплава Ti-6Al-4V, полученных методом селективного лазерного сплавления // Физика и химия обработки материалов. 2019. № 3. С. 46–57. DOI: 10.30791/0015-3214-2019-3-46-57
22. Пескова А.В., Сухов Д.И., Мазалов П.Б. Исследование формирования структуры материала титанового сплава VT6, полученного методами аддитивных технологий // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1(58). С. 38-44. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-38-44
23. Оспенникова О.Г., Наприенко С.А., Медведев П.Н., и др. Особенности структуры сплава Ti-6Al-4V, полученного методом селективного лазерного сплавления // Труды ВИАМ. 2019. № 10(82). С. 14-24. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-14-24
24. Агаповичев А.В., Смелов В.Г. Методика проектирования технологических процессов изготовления заготовок моноколес ГТД технологией селективного лазерного сплавления // Вестник УГАТУ. 2020. Т. 24. № 1(87). С. 85–92.
25. Дмитриева М.О., Мельников А.А., Головач А.М., Бондарева О.С., Смелов В.Г., Сотов А.В., Агаповичев А.В. Исследование структуры и свойств образцов из жаропрочного сплава Inconel 738, полученных методом селективного лазерного сплавления (SLM) // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2020. № 1. С. 23–31.
26. Алишин М.И., Князев А.Е. Производство металлопорошковых композиций высокой чистоты титановых сплавов методом индукционной газовой атомизации для аддитивных технологий // Труды ВИАМ. 2017. № 11 (59) С. 37–45. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-5-5
27. Князев А.Е., Неруш С.В., Алишин М.И., Куко И.С. Исследования технологических свойств металлопорошковых композиций титановых сплавов VT6 и VT20, полученных методом индукционной плавки и газовой атомизации // Труды ВИАМ. 2017. № 11(59). С. 37-45. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-6-6

References

1. Kablov E.N. *Kryl'ya Rodiny*, 2010, no. 4, pp. 31-33.
2. Somonov V.V. *Materialy VI Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii "Tekhnicheskie nauki: problemy i perspektivy" (St. Petersburg, 2018)*, St. Petersburg, Svoe izdatel'stvo, 2018, pp. 44-50.
3. Ni Ch., Zhu L., Zheng Zh., et al. Effect of material anisotropy on ultra-precision machining of Ti-6Al-4V alloy fabricated by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, vol. 848, 156457. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.156457
4. Garibov G.S. *Permskie aviatsionnye dvigateli*, 2012, no. 26, pp. 58-63.
5. Chang K., Liang E., Huang W., et al. Microstructural feature and mechanical property in different building directions of additive manufactured Ti6Al4V alloy. *Materials Letters*, 2020, vol. 267, 127516. DOI: 10.1016/j.matlet.2020.127516
6. Tlustenko S.F., Pervyshin A.N. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2011, no. 1(25), pp. 110-119.
7. Pavlinich S.P., Mysik R.K., Bakerin S.V., Brusnitsyn S.V., Sulitsin A.V. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2014, vol. 1, no. 4-1(20), pp. 62-69.
8. Kolesnikov A.V., Mikhailov I.V. Superplastic forming of aerospace facilities' parts and multilayer structures from vt20 titanium alloy. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 1, pp. 244-250.
9. Soldatenko I.V. On titanium alloys semiproducts quality control. *Aerospace MAI Journal*, 2016, vol. 23, no. 4, pp. 189-194.
10. Murav'ev V. I., Bakhmatov P. V., Grigor'ev V. V. Specific defects forming features while aircraft bulky titanium structures assembling. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 4, pp. 17-27. DOI: 10.34759/vst-2019-4-17-27
11. Song J., Han Y., Fang M. et al. Temperature sensitivity of mechanical properties and microstructure during moderate temperature deformation of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy. *Materials Characterization*, 2020, vol. 165, 110342. DOI: 10.1016/j.matchar.2020.110342
12. Caia Ch., Wua X., Liub W., Zhua W., Chenc H., Chua Dong Qiud J., Sund Ch-N., Liua J., Weia Q., Shia Y. Selective laser melting of near- α titanium alloy Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V: Parameter optimization, heat treatment and mechanical performance. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, vol 57, pp. 51-64. DOI: 10.1016/j.jmst.2020.05.004
13. Gu D.D., Meiners W., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser Additive Manufacturing of Metallic Components: Materials, Processes and Mechanisms, *International Materials Reviews*, 2012, vol. 57, no. 3, pp. 137-164. DOI: 10.1179/1743280411Y.0000000014
14. Waddell M., Walker K., Bandyopadhyay R., et al. Small fatigue crack growth behavior of Ti-6Al-4V produced via selective laser melting: In situ characterization of a 3D crack tip interactions with defects. *International Journal of Fatigue*, 2020, vol. 137, 105638. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105638
15. Lu P., Wu M., Liu X., Duan W., Han J. Study on Corrosion Resistance and Bio-Tribological Behavior of Porous Structure Based on the SLM Manufactured Medical Ti6Al4V. *Metals and Materials International*, 2020, vol. 26, pp. 1182-1191. DOI: 10.1007/s12540-019-00506-w
16. Balyakin A.V., Zhuchenko E.I., Smirnov G.V., Pronichev N.D. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 61-70.
17. Keaveney S., Shmeliov A., Nicolosi V., Dowling P.D. Investigation of process by-products during the Selective Laser Melting of Ti6Al4V powder. *Additive Manufacturing*, 2020, vol. 36, 101514. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101514
18. Gu H., Gong H., Dilip J.J.S. et al. Effects of powder variation on the microstructure and tensile strength of Ti6Al4V parts fabricated by selective laser melting. *25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium (4-6 August 2014; University of Texas Libraries at Austin)*, pp. 470-483.
19. Yan Q., Chen B., Kang N. et al. Comparison study on microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloys fabricated by powder-based selective-laser-melting and sintering methods. *Materials Characterization*, 2020, vol. 164: 110358. DOI: 10.1016/j.matchar.2020.110358
20. Liu S., Shin Y.C. Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review. *Materials & Design*, 2019, vol. 164: 107552. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.107552
21. Kaplan M.A., Smirnov M.A., Kirsankin A.A., Sevost'yanov M.A. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 2019, no. 3, pp. 46-57. DOI: 10.30791/0015-3214-2019-3-46-57
22. Peskova A.V., Sukhov D.I., Mazalov P.B. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2020, no. 1(58), pp. 38-44. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-38-44
23. Ospennikova O.G., Naprienko S.A., Medvedev P.N. et al. *Trudy VIAM*, 2019, 10(82), pp. 14-24. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-14-24
24. Agapovichev A.V., Smelov V.G. *Vestnik UGATU*, 2020, vol. 24, no. 1(87), pp. 85-92.
25. Dmitrieva M.O., Mel'nikov A.A., Golovach A.M. et al. *Vektor nauki Tol'yattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, no. 1, pp. 23-31.
26. Alishin M.I., Knyazev A.E. *Trudy VIAM*, 2017, no. 11 (59), pp. 37-45. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-5-5
27. Knyazev A.E., Nerush S.V., Alishin M.I., Kuko I.S. *Trudy VIAM*, 2017, no. 11(59), pp. 37-45. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-6-6

Статья поступила в редакцию 10.05.2023; одобрена после рецензирования 30.05.2023; принята к публикации 31.05.2023.

The article was submitted on 10.05.2023; approved after reviewing on 30.05.2023; accepted for publication on 31.05.2023.