
Научная статья

УДК 621.763

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-6-29-41

ВЛИЯНИЕ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА МЕТАЛЛОПОРШКОВОЙ КОМПОЗИЦИИ СПЛАВА VT6 НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ, СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СИНТЕЗИРОВАННОГО МАТЕРИАЛА, ПОЛУЧЕННОГО СЕЛЕКТИВНЫМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫМ СПЛАВЛЕНИЕМ

С.А. Сененко¹, И.А. Богачев¹, Ф.Л. Шошев¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Исследованы технологические свойства металлопорошковых композиций сплава VT6 различного фракционного состава. Образцы синтезированного материала получены методом селективного электронно-лучевого сплавления из металлопорошковых композиций различных фракций по штатному режиму. Исследованы структура и шероховатость поверхности синтезированных образцов. Определен максимально возможный диапазон фракций металлопорошковой композиции, подходящий для использования в процессе селективного лазерного электронно-лучевого сплавления без снижения характеристик синтезированного материала.

Ключевые слова: металлопорошковая композиция, селективное электронно-лучевое сплавление, аддитивные технологии, структура, шероховатость поверхности

Для цитирования: Сененко С.А., Богачев И.А., Шошев Ф.Л. Влияние фракционного состава металлопорошковой композиции сплава VT6 на шероховатость поверхности, структуру и механические свойства синтезированного материала, полученного селективным электронно-лучевым сплавлением // Труды ВИАМ. 2024. № 6 (136). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-6-29-41.

Scientific article

EFFECT OF THE FRACTIONAL COMPOSITION OF THE METAL-POWDER COMPOSITION OF THE VT6 ALLOY ON THE SURFACE ROUGHNESS, STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE PRINTED MATERIAL OBTAINED BY SELECTIVE ELECTRON BEAM MELTING

S.A. Senenko¹, I.A. Bogachev¹, F.L. Shoshev¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The technological properties of metal-powder compositions of VT6 alloy of different fractional composition are investigated. Synthesized samples were obtained by selective electron beam melting from metal-powder compositions of various fractions according to the standard parameters. The structure and surface roughness of the printed samples were studied. The widest possible range of fractions of the metal powder composition suitable for use in the process of selective laser electron beam melting without reducing the characteristics of the printed material has been determined.

Keywords: metal-powder composition, selective electron beam fusion, additive technologies, structure, surface roughness

For citation: Senenko S.A., Bogachev I.A., Shoshev F.L. Effect of the fractional composition of the metal-powder composition of the VT6 alloy on the surface roughness, structure and mechanical properties of the printed material obtained by selective electron beam melting. *Trudy VIAM*, 2024, no. 6 (136), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-6-29-41.

Введение

Одними из наиболее перспективных производственных процессов изготовления деталей сложных технических систем авиационной и ракетно-космической техники являются аддитивные технологии [1]. Ежегодный устойчивый тренд внедрения аддитивных технологий обусловлен планомерным освоением материалововедами, технологами и конструкторами различных отраслей промышленности новых возможностей, ставших доступными благодаря технологическим особенностям аддитивного производства:

- изготовление агрегатов в виде единой конструкции без сварных и паяных соединений;
- снижение массы деталей до 50 % за счет применения топологической оптимизации и агрегации, в том числе в результате исключения сварных и паяных соединений (сокращение количества деталей изделия до 70 %);
- повышение производительности технологии изготовления до 30 раз;
- создание элементов конструкций любой оптимальной сложности и формы, которые невозможно изготовить по традиционным технологиям;
- повышение коэффициента использования материалов до 0,98, отсутствие необходимости изготовления инструментальной и технологической оснастки, свойственной традиционным способам [2–5].

Применение титановых сплавов в аддитивных технологиях получило широкое распространение благодаря возможности изготавливать сложнопрофильные детали с небольшой массой и высокой удельной прочностью [6], которые используются в аэрокосмической отрасли, машиностроении, медицине и прочих наукоемких сферах [7, 8].

В настоящее время для изготовления деталей с помощью аддитивных технологий наиболее часто используют титановые сплавы системы Ti–Al–V. При этом применение селективного электронно-лучевого сплавления (СЭЛС) позволяет достичь высокого уровня механических характеристик, заданной геометрической формы детали без использования поддерживающих структур, исключает возникновение внутренних напряжений и горячих трещин за счет подогрева до высоких температур, что недоступно для серийных установок селективного лазерного сплавления [9, 10].

К порошкам, используемым для СЭЛС, предъявляются определенные требования по фракционному составу и технологическим свойствам, влияющим на стабильность процесса изготовления и свойства материала [9, 11].

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в процессе изготовления металлопорошковой композиции (МПК) сплавов системы Ti–Al–V (VT6) методом бестигельной атомизации изначально получается фракция от 0 до 200–250 мкм. После отсева для процесса селективного лазерного сплавления используется фракция 10–63 мкм. Фракция >63 мкм остается невостребованной, но может применяться для СЭЛС.

Цель данной работы – исследование влияния фракционного состава МПК сплава VT6 на шероховатость поверхности, структуру и свойства материала, полученного методом СЭЛС, для определения максимально возможного диапазона фракции, которую можно использовать без снижения характеристик синтезированного материала, в сравнении со стандартно используемой фракцией 40–100 мкм.

Материалы и методы

Для получения МПК сплава VT6 в качестве исходного материала использовали прутки, соответствующий ОСТ 1 90013–81. Массовая доля элементов в сплаве VT6 составила, %:

Al	V	Zr	Si	Fe	Mn	Cr	Cu	Ni	Mo	Nb	Sn	C	O	N	H
5,3–6,8	3,5–5,3	≤0,30	≤0,10	≤0,30	≤0,15	≤0,10	≤0,10		≤0,30			≤0,10	≤0,20	≤0,05	≤0,015

На установке вакуумной индукционной плавки и гранулирования проводили распыление специально подготовленного из прутка электрода. Процесс заключался в оплавлении торца вращающегося электрода, расположенного вертикально, с последующим стеканием расплавленного металла через форсунку, где происходило разбиение струи расплава на капли, кристаллизующиеся в среде инертного газа в частицы порошка. Полученный порошок отделяли от скрапа на просеивающей установке. Тонкие фракции отделяли на аэродинамическом центробежном классификаторе, последующий рассев на целевые фракции проводили на просеивающей установке [12, 13].

Форму частиц МПК сплава ВТ6 определяли с помощью программы анализа изображений согласно ГОСТ 25849–83. Исследование морфологии и микроструктуры частиц проводили на растровом электронном микроскопе [14, 15]. Локальный химический состав частиц определяли методом электронно-зондового микроанализа в соответствии с ГОСТ Р ИСО 22309–2015. Анализ и обработку данных проводили с применением специализированного программного обеспечения для электронно-зондового микроанализа [16].

Гранулометрический состав МПК сплава ВТ6 определяли на лазерном дифракционном анализаторе размера частиц согласно ГОСТ Р 8.777–2011 [17].

Синтезированный материал из МПК сплава ВТ6 получали на установке СЭЛС по базовым технологическим режимам печати: подогрев подложки до температуры 750 °С, скорость сканирования 0,5–3 м/с, вакуум $1,32 \cdot 10^{-2}$ Па, защитная среда – гелий. Толщина слоя составила 75 мкм. После синтеза заготовки образцов подвергали горячему изостатическому прессованию (ГИП) (при температуре 950 °С и давлении 150 МПа с выдержкой 3 ч [18]) и термической обработке (вакуумный отжиг при температуре 850 °С с выдержкой 2 ч) [19].

Шероховатость поверхности синтезированных образцов определяли на профилографе-профилометре и конфокальном лазерном микроскопе в режиме 3D-сканирования рельефа поверхности. Измерения проводили на образцах специальной формы (рис. 1) на поверхностях UpSkin, обращенных плоскостью от платформы построения, и DownSkin, обращенных плоскостью к платформе построения. Поверхности UpSkin и DownSkin реализованы на образцах в виде пластинок с углами наклона от 35 до 55 градусов с шагом 5 градусов.

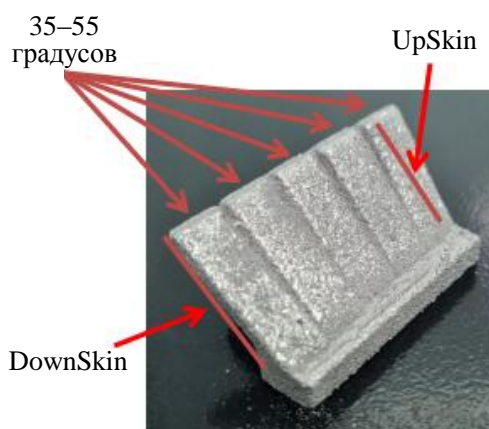


Рис. 1. Специальный образец для измерения шероховатости с поверхностями UpSkin и DownSkin

Синтезированные образцы в состоянии до, а также после ГИП и термической обработки исследовали методом оптической микроскопии для определения остаточной пористости и микроструктуры материала.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Исследование металлопорошковой композиции сплава ВТ6

Для исследования химического состава и содержания газовых примесей порошок, полученный методом газовой атомизации, разделен на фракции методом сухого просеивания на ситах с ячейками № 0,08; 0,1; 0,14 и 0,2. Для исследований выделены четыре фракции: 63–80, 63–100, 63–140 и 63–200 мкм. Результаты гранулометрического анализа выделенных фракций представлены в табл. 1.

Таблица 1

Гранулометрический состав металлопорошковой композиции сплава ВТ6

Фракция, мкм	Объемная доля, %	
	меньше диапазона	больше диапазона
63–80	7,25	8,5
63–100	7,11	7,1
63–140	5,43	6,21
63–200	5,12	0,87

По результатам исследования и анализа фракционного состава МПК выявлено, что доля частиц размером <63 мкм во всех фракциях составляет от 5,12 до 7,25 %. Доля частиц размером, превышающим верхнюю границу фракции, уменьшается с 8,5 до 0,87 % при увеличении верхней границы от 80 до 200 мкм. Наибольшее совпадение с заданным фракционным интервалом исследуемого порошка обнаружено во фракции 63–200 мкм (рис. 2). Тем не менее объемная доля частиц размером <63 мкм во всех исследованных фракциях не превышает допустимых значений для обеспечения стабильности СЭЛС.

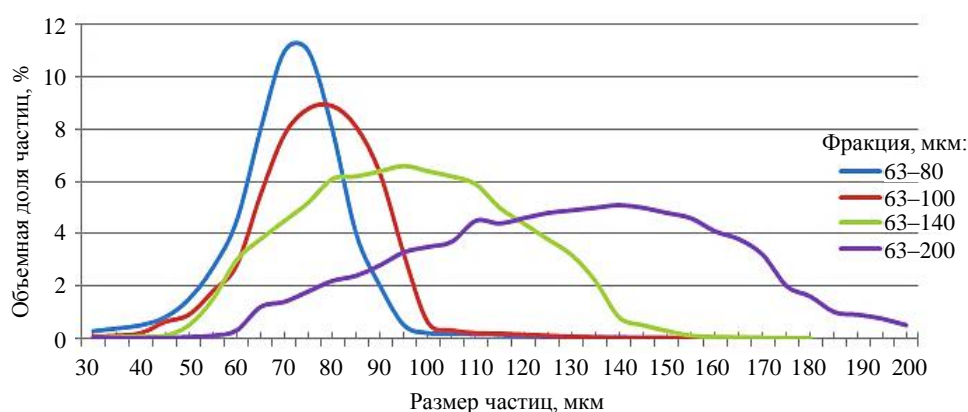


Рис. 2. Зависимость объемной доли частиц исследованных фракций от размера

Проведен атомно-эмиссионный анализ химического состава и газовых примесей проб, отобранных из четырех различных фракций МПК сплава ВТ6. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

Химический состав и газовые примеси металлопорошковой композиции сплава ВТ6 в соответствии с ОСТ 1 90013–81

Фракция, мкм	Массовая доля, %									
	Ti	Al	Zr	Si	Fe	H	V	O	N	Примеси
63–80	Осно- ва	6,29	0,093	0,034	0,11	0,0015	3,82	0,058	0,0027	0,093
63–100		6,26	0,100	0,07	0,11	0,0025	4,00	0,073	0,0022	0,093
63–140		6,29	0,004	0,031	0,21	0,0020	4,10	0,098	0,0020	0,096
63–200		6,23	0,003	0,027	0,13	0,0010	4,07	0,065	0,0027	0,074
Норма по ОСТ 1 90013–81		5,3–6,8	<0,30	<0,10	<0,25	<0,03	3,5–5,3	<0,20	<0,03	<0,30

Химический анализ показал, что все исследуемые МПК соответствуют ОСТ 1 90013–81. Различий химического состава по основным легирующим элементам и примесям в изученных фракциях не обнаружено.

При определении морфологии частиц МПК сплава ВТ6 обнаружены частицы сферической и округлой формы (рис. 3). Сводные результаты количественного металлографического анализа приведены в табл. 3.

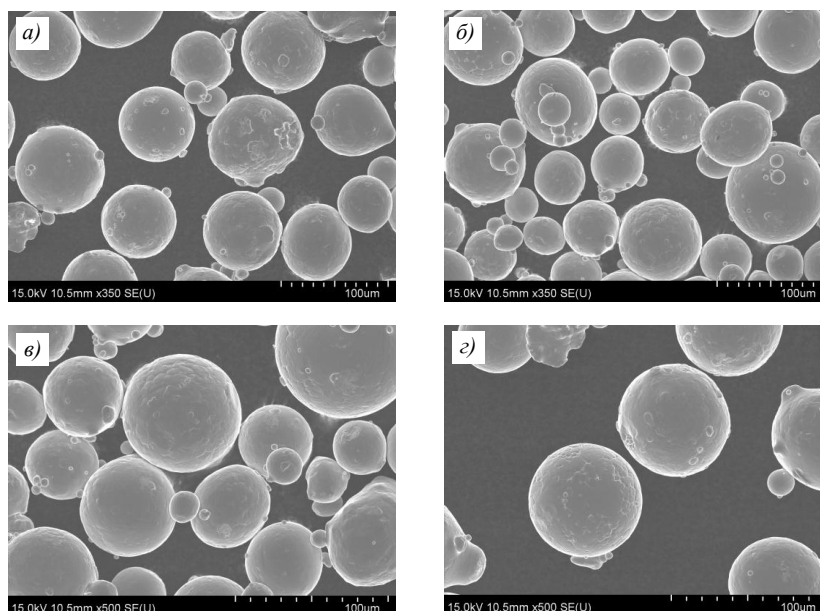


Рис. 3. Внешний вид частиц фракций 63–80 (а), 63–100 (б), 63–140 (в) и 63–200 мкм (г) металлопорошковой композиции сплава ВТ6

Таблица 3

Результаты количественного металлографического анализа формы частиц металлопорошковой композиции сплава ВТ6

Фракция, мкм	Количество проанализированных частиц, шт.	Вытянутость l_{max}/l_{min}	Параметр формы P/\sqrt{S}	Объемная доля частиц различной формы, %		
				сферической	округлой	угловатой
63–80	270	1,10±0,01	3,97±0,01	85,3	13,1	1,6
63–100	263	1,11±0,01	3,97±0,01	82,2	13,9	3,9
63–140	257	1,09±0,01	3,93±0,01	84,9	14,2	0,9
63–200	249	1,08±0,01	3,96±0,01	86,3	13,8	2,4

Параметр вытянутости l_{\max}/l_{\min} для МПК всех четырех фракций порошка не превышает 1,2, что свидетельствует о сферической форме частиц в соответствии с ГОСТ 25849–83. Морфология частиц близка к сферической с незначительным присутствием сателлитов. Объемная доля частиц сферической формы для всех фракций превышает 80 %, что обеспечивает удовлетворительную текучесть порошка.

Таким образом, исследованные фракции МПК сплава ВТ6 по своему химическому составу и содержанию примесей, наличию частиц размером <63 мкм, а также морфологии существенно не различаются, могут использоваться для получения и исследования зависимости характеристик синтезированного материала от гранулометрического состава используемой МПК.

Исследование синтезированного материала

Проведен количественный анализ остаточной пористости синтезированных образцов (табл. 4). Объемная доля пор во всех образцах находится в интервале от 0,45 до 0,73 %, средний размер пор – от 5,4 до 7,37 мкм.

Таблица 4

Содержание пор в синтезированном материале

Фракция, мкм	Сечение	Объемная доля пор, %	Размер пор, мкм	
			средний	максимальный
63–80	Поперечное	0,45	7,37	43,54
	Продольное	0,70	6,30	65,1
63–100	Поперечное	0,58	5,67	28,00
	Продольное	0,57	6,00	39,6
63–140	Поперечное	0,73	6,58	35,2
	Продольное	0,72	6,17	27,4
63–200	Поперечное	0,61	5,40	19,35
	Продольное	0,49	5,40	25,8

Следует отметить, что объемная доля пор в исследованных образцах находится в достаточно узком интервале, что может свидетельствовать об определяющем влиянии на этот параметр непосредственно технологических режимов сплавления, а не фракционного состава используемой МПК. Тем не менее наблюдается тенденция к уменьшению максимального размера пор при увеличении диапазона фракции МПК как в поперечном, так и в продольном сечении. Это, предположительно, может быть связано с тем, что из-за более широкого диапазона размеров частиц увеличивается плотность их упаковки, свободное пространство между ними уменьшается.

Структура синтезированных образцов после СЭЛС состоит из ячеек и игл α' -фазы (мартенсита), а также незначительного количества β -фазы в прослойках между ячейками (рис. 4). Такая структура объясняется особенностями процесса СЭЛС, в частности температурой подогрева платформы и скоростями кристаллизации расплава при печати. Высокие скорости охлаждения способствуют формированию мартенситной структуры вследствие закалки из высокотемпературной β -области при температуре выше температуры ($\alpha \rightarrow \beta$)-превращения, а выдержка уже синтезированного материала при температуре подогрева платформы способствует выделению β -фазы [20, 21]. Различий в структуре материала после СЭЛС в зависимости от используемой фракции МПК не выявлено.



Рис. 4. Характерная структура синтезированного материала после селективного электронно-лучевого сплавления

В материале после ГИП и термической обработки остаточная пористость не обнаружена. Структура представлена первичными пластинами α -фазы толщиной 5–20 мкм, мелкими пластинами вторичной α -фазы толщиной 1–10 мкм и прослойками β -фазы между ними (рис. 5).

Различий в структуре материала после ГИП и термической обработки также не выявлено, что связано с кинетикой образования мартенсита при высокоскоростной кристаллизации материала в процессе СЭЛС и его распада при последующих термических воздействиях.



Рис. 5. Характерная структура синтезированного материала после горячего изостатического прессования и термической обработки

По результатам определения шероховатости с помощью профилографа-профилометра выявлено, что данный метод не позволяет исследовать образцы, полученные методом СЭЛС. Причиной является высокая шероховатость поверхности. Для поверхности UpSkin с углом наклона 35 градусов получены следующие значения:

Фракция, мкм	63–200	63–140	63–100	63–80
Шероховатость R_a , мкм	23,2	23,4	23,6	23,3

Графики, полученные с использованием профилографа-профилометра, представлены на рис. 6.

Поверхность сплава после СЭЛС имеет большой разброс между максимумом и минимумом профилей поверхности. Данные значения выходят за рамки технологических возможностей профилографа-профилометра. В связи с этим измерение шероховатости на профилографе-профилометре невозможно из-за разброса значений по высотам на поверхности образца при угле наклона больше и меньше 45 градусов, составляющих

~40 мкм. Поэтому для определения шероховатости поверхности использовали лазерный микроскоп, имеющий большой диапазон определения профиля поверхности. Методом конфокального исследования получены параметры шероховатости по площади (S_a). Замеры проводили в торцевых частях образца и в середине. Площадь измерения составила 3×3 мм.

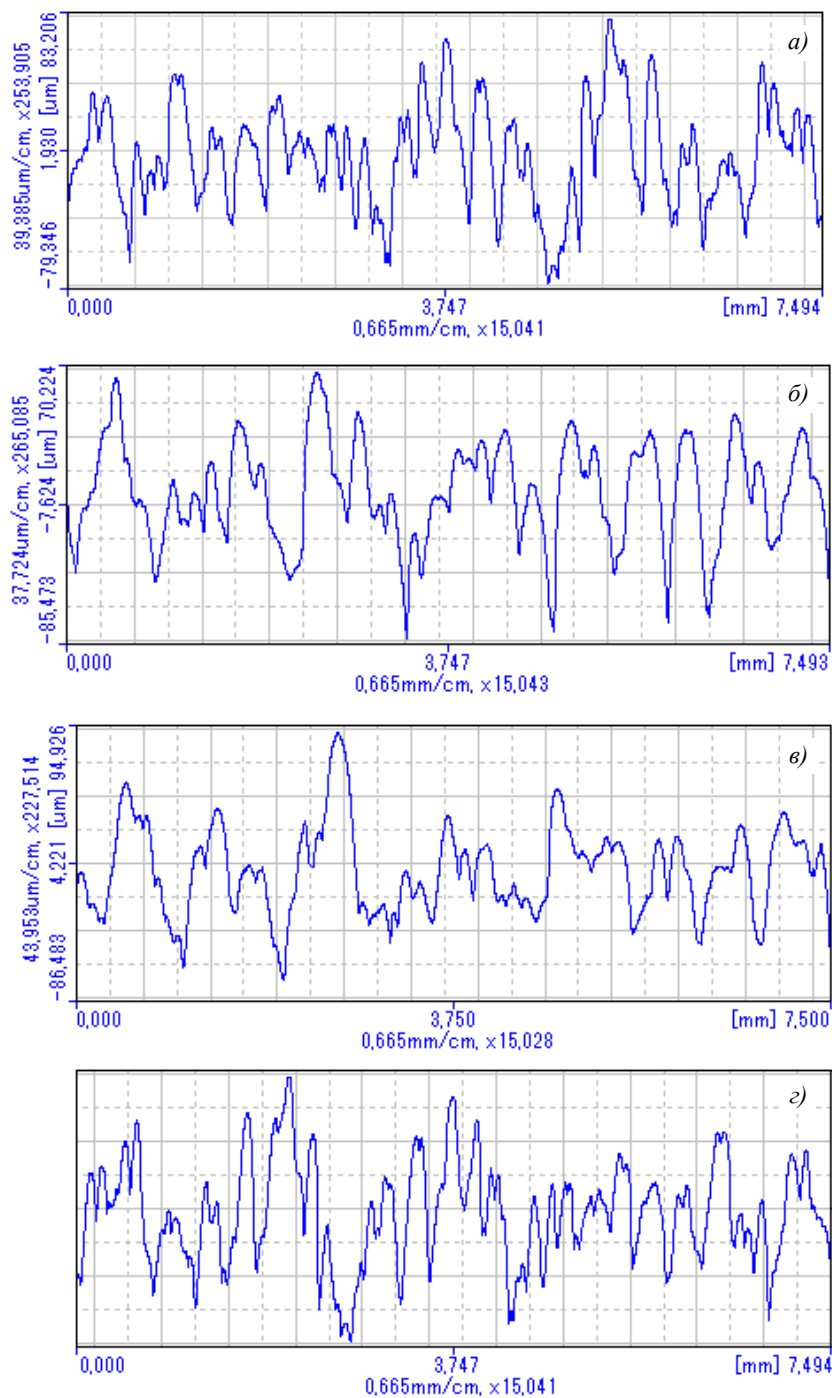


Рис. 6. Профилограммы образцов сплава ВТ6 из фракций 63–200 (а), 63–140 (б), 63–100 (в) и 63–80 мкм (г)

Результаты исследования шероховатости на лазерном микроскопе представлены в табл. 5 и на рис. 7.

Таблица 5

Шероховатость поверхности синтезированных образцов сплава ВТ6, исследованная с помощью лазерного микроскопа

Фракция, мкм	Поверхность	Шероховатость поверхности по площади S_a , мкм, при угле наклона, градус				
		35	40	45	50	55
63–200	UpSkin	59,77±1	64,77±1	68,10±1	70,17±1	84,67±1
	DownSkin	60,03±1	46,67±1	40,70±1	39,57±1	42,23±1
63–140	UpSkin	42,90±1	42,70±1	44,36±1	44,37±1	55,86±1
	DownSkin	65,86±1	49,93±1	43,38±1	45,92±1	45,79±1
63–100	UpSkin	55,97±1	45,68±1	71,60±1	67,98±1	80,10±1
	DownSkin	81,36±1	73,63±1	50,17±1	36,32±1	36,35±1
63–80	UpSkin	57,27±1	62,43±1	63,37±1	73,88±1	83,23±1
	DownSkin	50,86±1	40,13±1	32,57±1	33,97±1	36,23±1

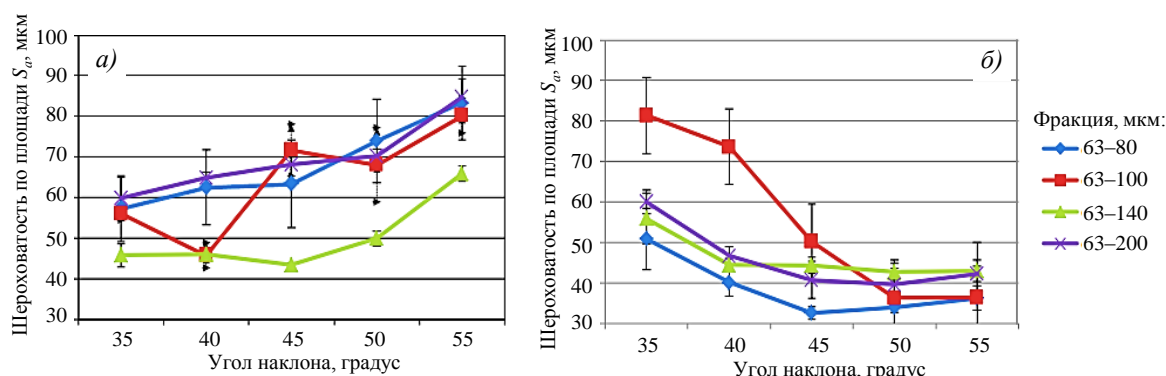


Рис. 7. Зависимости шероховатости поверхностей UpSkin (а) и DownSkin (б) от фракционного состава

Наименьшую шероховатость поверхности имеет образец с углом наклона 45 градусов из фракции 63–80 мкм. Согласно результатам аналитического расчета, отклонение поверхностей UpSkin и DownSkin составило $0,2S_a$. Можно утверждать, что полученные графики эквивалентны друг другу. Но, если учитывать усредненные значения параметров других фракций, можно сделать вывод, что графики зависимости шероховатости поверхностей UpSkin и DownSkin от угла наклона накладываются друг на друга.

По результатам механических испытаний выявлено, что при проведении термической обработки данного сплава по сравнению с деформированным прутком (ОСТ 1 90000–70) наблюдается более высокая пластичность, но более низкая прочность (табл. 6).

Таблица 6

Результаты физико-механических испытаний на растяжение

Образец	Модуль упругости, ГПа	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %
Кованый пруток (закалка при температуре 850 °С, отпуск при температуре 400 °С)	122	1030	1130	8,0
Сплав ВТ6 после селективного электронно-лучевого сплавления, горячего изостатического прессования и термической обработки из фракции, мкм:				
63–80	110	910	990	14,0
63–100	112	900	980	14,5
63–140	110	870	1000	12,0
63–200	113	920	980	13,5

Механические испытания на сжатие проведены на образцах диаметром 10 мм и высотой 15 мм. Данные геометрические размеры выбраны в соответствии с линейным законом устойчивости, чтобы образец не потерял устойчивость во время нагружения и не разрушился. Предел прочности при сжатии не определяли, так как сплав обладает высокой пластичностью. Результаты испытаний представлены в табл. 7.

Таблица 7

Результаты физико-механических испытаний на сжатие образцов сплава ВТ6 после селективного электронно-лучевого сплавления, горячего изостатического прессования и термической обработки

Фракция, мкм	Модуль упругости, ГПа	Предел текучести, МПа
63–80	120	920
63–100	119	930
63–140	121	920
63–200	118	940

По результатам механических испытаний существенного влияния диапазона фракций на свойства синтезированного материала не выявлено.

Следует отметить, что ячеистая структура, сформированная при СЭЛС и состоящая из β -фазы, а также пластин α -фазы, обеспечивает высокую прочность и низкую пластичность синтезированного материала. Для придания требуемого комплекса механических характеристик проводится ГИП и термическая обработка. После ГИП увеличивается размер β -зерна и пластин α -фазы, вследствие чего снижается прочность, но увеличивается пластичность материала. Чтобы достичь оптимального соотношения прочности и пластичности, проводят термическую обработку, после которой происходит выделение вторичной α -фазы, способствующей повышению прочности при сохранении высокой пластичности.

Заключения

Установлено, что химический состав полученных МПК различного фракционного состава соответствует ОСТ 1 90013–81. Не выявлено зависимости химического состава по основным легирующим элементам и примесям от фракции МПК. Морфология частиц, близкая к сферической, с незначительным присутствием сателлитов характерна для всех фракций.

Определено, что доля частиц размером <63 мкм во всех фракциях не превышает 7,25 %. При этом доля частиц размером, превышающим верхнюю границу фракции, уменьшается от 8,5 до 0,87 % при увеличении верхней границы от 80 до 200 мкм. Объемная доля частиц размером <63 мкм во всех исследованных фракциях не превышает допустимых значений для обеспечения стабильности СЭЛС.

Выявлена тенденция к уменьшению максимального размера пор при увеличении диапазона фракции как в поперечном, так и в продольном сечении. По-видимому, это связано с более широким диапазоном размеров частиц, в результате чего увеличивается плотность их упаковки и уменьшается свободное пространство между ними. Зависимости величины остаточной пористости от диапазона фракции не наблюдается. Исследованные фракции МПК сплава ВТ6 по химическому составу и содержанию примесей, наличию частиц размером <63 мкм, а также морфологии существенно не различаются. Фракции можно применять для получения синтезированного материала методом СЭЛС и исследования зависимости его характеристик от гранулометрического состава используемой МПК.

Установлено, что при повышении угла наклона с 35 до 55 градусов шероховатость поверхности UpSkin увеличивается с $42,90 \pm 1$ до $84,67 \pm 1$ мкм, в то время как на

поверхности DownSkin наблюдается обратный эффект – шероховатость уменьшается с $81,36 \pm 1$ до $36,23 \pm 1$ мкм. Это связано с тем, что при увеличении угла наклона на поверхности UpSkin происходит приплавление частиц порошка за счет большой зоны термического влияния электронного луча, и шероховатость достигает максимума при угле 90 градусов. На поверхности DownSkin, наоборот, приплавление частиц усиливается при уменьшении угла наклона, максимум шероховатости достигается при 0 градусов. Влияния фракционного состава на шероховатость поверхности не выявлено.

Исходя из полученных результатов можно утверждать, что фракцию 63–200 мкм МПК сплава ВТ6 допустимо использовать при изготовлении неотчетственных деталей методом СЭЛС. Для получения ответственных деталей требуется проведение дополнительных исследований механических характеристик, в частности усталостных свойств материала.

Показана возможность увеличения экономической эффективности производства МПК сплава ВТ6 методом бестигельной атомизации за счет вовлечения фракции большего диапазона МПК (до 200 мкм): фракцию 10–63 мкм можно использовать для процесса селективного лазерного сплавления, фракцию 63–200 мкм – для технологии СЭЛС.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (134). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н., Ночовная Н.А., Панин П.В., Алексеев Е.Б., Новак А.В. Исследование структуры и свойств жаропрочных сплавов на основе алюминидов титана с микродобавками гадолиния // *Материаловедение*. 2017. № 3. С. 3–10.
3. Хорев А.И. Титановые сплавы для авиакосмической техники и перспектива их развития // *Авиационные материалы и технологии*. 2002. Вып.: Перспективные алюминиевые, магниевые и титановые сплавы для авиакосмической техники. С. 11–32.
4. Иноземцев А.А., Башкатов И.Г., Коряковцев А.С. Титановые сплавы в изделиях разработки ОАО «Авиадвигатель» // *Современные титановые сплавы и проблемы их развития*. М.: ВИАМ, 2010. С. 43–46.
5. Korner C. Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting – a review // *International Materials Reviews*. 2016. Vol. 61. No. 5. P. 361–377.
6. Панин П.В., Ночовная Н.А., Каблов Д.Е., Алексеев Е.Б., Ширяев А.А., Новак А.В. Практическое руководство по металлографии сплавов на основе титана и его интерметаллидов: учеб. пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2020. 200 с.
7. Murr L.E., Gaytan S.M. Electron beam melting // *Comprehensive materials processing*. 2014. Vol. 10. P. 135–161.
8. Wentao Y., Wenjun G., Ya Q. et al. Multi-physics modeling of single/multiple-track defect mechanisms in electron beam selective melting // *Acta Materialia*. 2017. Vol. 134. P. 324–333.
9. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: справочник. М.: ВИЛС–МАТИ, 2009. 520 с.
10. Каблов Д.Е., Панин П.В., Ширяев А.А., Ночовная Н.А. Опыт использования вакуумно-дуговой печи ALD VAR L200 для выплавки слитков жаропрочных сплавов на основе алюминидов титана // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № 2 (31). С. 27–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-27-33.
11. Tang H.P., Qian M., Liu N. et al. Effect of powder reuse times on additive manufacturing of Ti–6Al–4V by selective electron beam melting // *Journal of the minerals, metals & materials society*. 2015. Vol. 67 (3). P. 555–563.
12. Guoqing C., Binggang Z., Wei L., Jicai F. Crack formation and control upon the electron beam welding of TiAl-based alloys // *Intermetallics*. 2011. Vol. 19. P. 1857–1863.
13. Дудихин Д.В., Сапрыкин А.А. Способы получения сферических порошков для аддитивных лазерных технологий // *Masters Journal*. 2016. No. 1. P. 51–55.

14. Князев А.Е., Востриков А.В. Рассев порошков в аддитивном и гранульном производствах (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 11 (93). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.11.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-11-11-20.
15. Vrancken B., Thijs L., Kruth J.-P., Van Humbeeck J. Heat treatment of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting: Microstructure and mechanical properties // Journal of Alloys and Compounds. 2012. Vol. 541. P. 177–185.
16. Грирогенко В.Б., Морозова Л.В. Применение растровой электронной микроскопии для изучения начальных стадий разрушения // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 1 (50). С. 77–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-77-87.
17. Дзунович Д.А., Алексеев Е.Б., Панин П.В., Лукина Е.А., Новак А.В. Структура и свойства листовых полуфабрикатов из деформируемых интерметаллидных титановых сплавов разных классов // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 2 (51). С. 17–25. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-17-25.
18. Пескова А.В., Сухов Д.И., Мазалов П.Б. Исследование формирования структуры материала титанового сплава ВТ6, полученного методами аддитивных технологий // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 38–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-38-44.
19. ASTM F2924-14. Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion. URL: <https://www.astm.org> (дата обращения: 12.10.2023). DOI: 10.1520/F2924-14.
20. Каблов Е.Н., Ночовная Н.А., Ширяев А.А., Давыдова Е.А. Исследование структурно-фазовых превращений в псевдо-β-титановых сплавах и влияния скорости охлаждения с температуры гомогенизации на структуру и свойства сплава ВТ47. Часть 1 // Труды ВИАМ. 2020. № 6–7 (89). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.11.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-3-10.
21. Бурковская Н.П., Бобровский А.П., Ефимочкин И.Ю., Большакова А.Н. Сфероидизация порошковых композиций на основе тугоплавких металлов (обзор). Часть 1 // Труды ВИАМ. 2023. № 1 (119). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.09.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-1-128-138.

References

1. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Kablov E.N., Nochovnaya N.A., Panin P.V., Alekseev E.B., Novak A.V. Study of the structure and properties of heat-resistant alloys based on titanium aluminides with gadolinium microadditives. *Materialovedenie*, 2017, no. 3, pp. 3–10.
3. Khorev A.I. Titanium alloys for aerospace technology and the prospects for their development. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2002, is: Promising aluminum, magnesium and titanium alloys for aerospace technology, pp. 11–32.
4. Inozemtsev A.A., Bashkatov I.G., Koryakovtsev A.S. Titanium alloys in products developed by Aviadvigatel OJSC. *Modern titanium alloys and problems of their development*. Moscow: VIAM, 2010, pp. 43–46.
5. Korner C. Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting – a review. *International Materials Reviews*, 2016, vol. 61, no. 5, pp. 361–377.
6. Panin P.V., Nochovnaya N.A., Kablov D.E., Alekseev E.B., Shiryaev A.A., Novak A.V. *Practical guide to metallography of alloys based on titanium and its intermetallic compounds: textbook*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2020, 200 p.
7. Murr L.E., Gaytan S.M. Electron beam melting. *Comprehensive materials processing*, 2014, vol. 10, pp. 135–161.
8. Wentao Y., Wenjun G., Ya Q. et al. Multi-physics modeling of single/multiple-track defect mechanisms in electron beam selective melting. *Acta Materialia*, 2017, vol. 134, pp. 324–333.
9. Ilyin A.A., Kolachev B.A., Polkin I.S. *Titanium alloys. Composition, structure, properties: reference book*. Moscow: VILS–MATI, 2009, 520 p.

10. Kablov D.E., Panin P.V., Shiryaev A.A., Nochovnaya N.A. The use of ADL VAR L200 vacuum-arc furnace for ingots fabrication of high-temperature titanium aluminides base alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. 2, pp. 27–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-27-33.
11. Tang H.P., Qian M., Liu N. et al. Effect of powder reuse times on additive manufacturing of Ti–6Al–4V by selective electron beam melting. *Journal of the minerals, metals & materials society*, 2015, vol. 67 (3), pp. 555–563.
12. Guoqing C., Binggang Z., Wei L., Jicai F. Crack formation and control upon the electron beam welding of TiAl-based alloys. *Intermetallics*, 2011, vol. 19, pp. 1857–1863.
13. Dudikhin D.D., Saprykin A.A. Methods for producing of spherical powders for additive laser technologies. *Masters Journal*, 2016, no. 1, pp. 51–55.
14. Knyazev A.E., Vostrikov A.V. Sieving of powders additive and powder manufacturings (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 11 (93), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 14, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-11-11-20.
15. Vrancken B., Thijs L., Kruth J.-P., Van Humbeeck J. Heat treatment of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting: Microstructure and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, vol. 541, pp. 177–185.
16. Grigorenko V.B., Morozova L.V. Application of the scanning electron microscopy for studying of initial destruction stages. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 1 (50), pp. 77–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-77-87.
17. Dzunovich D.A., Alekseyev E.B., Panin P.V., Lukina E.A., Novak A.V. Structure and properties of sheet semi-finished products from various wrought intermetallic titanium alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 17–25. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-17-25.
18. Peskova A.V., Sukhov D.I., Mazalov P.B. Examination of the formation of the titanium alloy VT6 structure obtained by additive manufacturing. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 38–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-38-44.
19. ASTM F2924-14. *Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion*. Available at: <https://www.astm.org> (accessed: October 12, 2023). DOI: 10.1520/F2924-14.
20. Kablov E.N., Nochovnaya N.A., Shiryaev A.A., Davydova E.A. Investigation of structural and phase transformations in metastable β -titanium alloys and effect of cooling rate from homogenization temperature on structure and properties of VT47 alloy. Part 1. *Trudy VIAM*, 2020, no. 6–7 (89), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 13, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-67-3-10.
21. Burkovskaya N.P., Bobrovsky A.P., Efimochkin I.Yu., Bolshakova A.N. Spheroidization of powder compositions based on refractory metals (review). Part 1. *Trudy VIAM*, 2023, no. 1 (119), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 11, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-1-128-138.

Информация об авторах

Сененко Сергей Алексеевич, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Богачев Игорь Александрович, начальник сектора, к.ф.-м.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Шошев Федор Львович, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Sergei A. Senenko, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Igor A. Bogachev, Head of Sector, Candidate of Sciences (Phys. & Math.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Fyodor L. Shoshev, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 15.03.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 08.05.2024.
The article was submitted 15.03.2024; approved and accepted for publication after reviewing 08.05.2024.