

УДК 621.762

А.Е. Князев¹, С.В. Неруш¹, М.И. Алишин¹, И.С. Куко¹

**ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
МЕТАЛЛОПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ
ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ VT6 И VT20,
ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ИНДУКЦИОННОЙ ПЛАВКИ
И ГАЗОВОЙ АТОМИЗАЦИИ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-6-6

Представлены исследования технологических свойств и морфологии металлопорошковых композиций (металлических порошков) титановых сплавов VT6 и VT20, полученных методом индукционной плавки и газовой атомизации.

Проведены исследования химического состава, газовой пористости, морфологии поверхности и других технологических свойств металлопорошковых композиций из сплавов марок VT6 и VT20.

Работа выполнена в рамках освоения технологии получения мелкодисперсных металлопорошковых композиций титановых сплавов VT6 и VT20 и расширения применения данных сплавов в области аддитивных технологий.

Ключевые слова: *металлопорошковые композиции, титановые сплавы марок VT6 и VT20, технологические свойства, индукционная плавка, газовая атомизация.*

This article presents the researches of the technological properties of metal-powder compositions of VT6 and VT20 titanium alloys obtained by induction melting and gas atomization.

Researches of chemical composition, gas porosity, surface morphology and other technological properties of metal-powder compositions of VT6 and VT20 titanium alloys were conducted.

Work is performed within development of technology of receiving the fine-dispersed of metal-powder compositions of VT6 and VT20 titanium alloys for enhancing of their use in the additive technologies.

Keywords: *metal-powder compositions, titanium alloys VT6 and VT20, technological properties, induction melting, gas atomization.*

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Наиболее интенсивно развивающимся направлением в последнее время является применение аддитивных технологий для промышленного производства изделий авиационной техники [1–7]. Внедряя аддитивные технологии для изготовления деталей, имеющих сложную конструкцию, можно добиться не только существенного уменьшения массы и снижения стоимости изготовления, но и обеспечить возможность повышения топливной экономичности и надежности двигателей на основе применения оптимизированных конструкций [8].

Титановые сплавы нашли широкое применение в авиационной промышленности. Это обусловлено такими свойствами титановых сплавов, как малая плотность, высокая удельная прочность, теплостойкость и жаропрочность. Например, корпорация Boeing с помощью аддитивных технологий и 3D-печати изготавливает в год 20 тысяч

деталей 300 наименований для 10 типов военных и коммерческих самолетов [9]. В современных газотурбинных двигателях весовая доля титановых сплавов составляет ~40% [7].

Однако существуют сложности, сдерживающие применение аддитивных технологий в промышленности, к которым следует отнести следующие факторы: высокая стоимость порошковых композиций, ограниченные объемы производства качественных порошков из титановых сплавов с размером частиц 10–63 мкм. Малые объемы производства отечественных высококачественных порошков из титановых сплавов, пригодных к использованию при изготовлении деталей по аддитивным технологиям, и высокая стоимость порошков иностранных производителей являются главными сдерживающими факторами для широкого развития данного направления в России.

В настоящее время российские предприятия для получения изделий методами селективного лазерного сплавления в основном вынуждены использовать импортные порошки, поставляемые компаниями-производителями установок. Оптовая цена таких порошковых материалов на внешнем рынке приблизительно такова: 230 евро/кг – для титановых сплавов, 200 евро/кг – для сплава системы Ti–6Al–4V, а российским потребителям они обходятся как минимум вдвое, а то и втрое дороже, что формирует изначально высокую стоимость деталей, полученных с помощью аддитивных технологий, и что не менее важно – приводит к сырьевой зависимости от зарубежных поставщиков.

В настоящее время рядом российских компаний (АО «Гиредмет», ООО «Нормин», ЗАО «Микромет», ОАО «Композит», АО «Полема») ведутся работы по внедрению менее затратных технологий производства порошков из титановых сплавов, пригодных для применения в аддитивных технологиях. Решение вопроса производства высококачественных металлопорошковых композиций из титановых сплавов с высоким выходом годного по используемым в аддитивных технологиях фракциям (особенно мелкодисперсным – менее 63 мкм) – для обеспечения рентабельности, а также необходимых технологических свойств, приведет к прорыву в этом направлении и значительному росту объемов исследований и разработок.

Во ФГУП «ВИАМ» спроектирована, изготовлена и введена в эксплуатацию установка ВИПиГР 50/500, работающая по методу бестигельной индукционной плавки и газовой атомизации, для получения металлопорошковых композиций из сплавов на основе таких активных металлов, как титан, цирконий или тугоплавких сплавов на основе ниобия, хрома, а также сплавов на основе никеля и железа.

Данная установка является собственной разработкой ФГУП «ВИАМ». При этом металл распрыляют без использования плавильного тигля. В качестве исходной заготовки используют цилиндрические прутки, которые расплавляют с использованием индуктора. Благодаря вращению прутка обеспечивается его равномерное оплавление. Расплавленные капли металла стекают в форсунку и диспергируются инертным газом.

Титан при нагреве хорошо взаимодействует с контактируемыми поверхностями. При этом происходит диффузия химических элементов в расплав, а также растворение частиц из футеровки. В связи с этим благодаря бестигельной плавке титановых сплавов можно получать металлопорошковые композиции высокой чистоты, так как исключен контакт расплава с поверхностью тигля.

Основными марками, планируемыми к освоению на установке ВИПиГР 50/500, являются титановые сплавы VT6 и VT20. Необходимо также провести исследования технологических характеристик первых полученных пробных партий металлопорошковых композиций.

Сплав марки VT6 является отечественным аналогом сплава системы Ti–6Al–4V, который получил широкое применение в промышленности и медицине благодаря

хорошему комплексу механических свойств, а также большому массиву экспериментальных данных. В связи с этим титановый сплав ВТ6 нашел широкое применение в авиационно-космической промышленности.

Сплав марки ВТ20 является высокопрочным и применяется АО «ОДК-Авиадвигатель» в производстве изделий методами аддитивных технологий.

Важное значение для изделий, получаемых методами аддитивных технологий, имеют технологические характеристики порошковых материалов. Разрабатываемые металлопорошковые композиции должны обладать определенными свойствами и особенностями, которые необходимы для исходного сырья применяемого для аддитивных технологий. Так, в ряде научно-технических литературных источников [10–14] упоминается о сферичности или округлости частиц, т. е. необходим высокий коэффициент сферичности. Первичным критерием от поставщиков оборудования для аддитивных технологий является требование по гранулометрическому составу. Форма порошков обусловлена требованиями по «текучести» для частиц выбранной фракции.

Подача материала с минимальным сопротивлением достигается именно при сферической форме частиц, поскольку в основе обработки лежит распределение порошка по поверхности или прямая подача порошка (выращивание с помощью коаксиальной наплавки лазером: LMD – Laser Metal Deposition и DMD – Direct Metal Deposition) [15]. Округлые или сферические частицы обеспечивают полное заполнение формы и получение качественных изделий. Требования по среднему размеру частиц и гранулометрическому составу отличаются и зависят от производителя соответствующего оборудования [16].

Традиционное производство в целом надежно обеспечивает воспроизводимость структуры и свойств материалов. Процессы, происходящие при аддитивных технологиях, являются более сложными, и для получения приемлемого качества изделия в ряде случаев свойства материала и требования к нему будут отличаться от установки к установке. В связи с этим для удовлетворения требований, предъявляемых к исходным материалам (металлопорошковым композициям), необходимо дальнейшее изучение их технологических и физических свойств, методов подготовки и способов описания характеристик порошковых материалов, что позволит повысить стабильность процесса, воспроизводимость и надежность результатов, улучшить качество изделий при сохранении низкой стоимости исходных материалов.

Таким образом, с точки зрения обеспечения аддитивных технологий исходным сырьем по титановым сплавам в России существуют следующие проблемы: небольшие объемы производства, отсутствие широкой номенклатуры российских металлопорошковых композиций, отсутствие данных по технологическим характеристикам для определения возможности использования в конкретной установке, отсутствие нормативной базы.

Данная работа посвящена исследованию технологических свойств металлопорошковых композиций титановых сплавов ВТ6 и ВТ20, изготовленных на новой установке ВИПиГР 50/500, созданной во ФГУП «ВИАМ», – для их применения в аддитивных технологиях.

К технологическим свойствам относятся: текучесть, насыпная плотность и угол естественного откоса. Исследовалась также газовая пористость и морфология частиц композиций из титановых сплавов.

Технологические характеристики порошков основываются на следующих испытаниях: определение текучести с помощью воронки Холла; измерение угла естественного откоса и насыпной плотности; исследование морфологии с помощью сканирующего

электронного микроскопа (SEM) и пористости – с помощью SEM или оптической микроскопии; определение размера частиц лазерной дифракцией.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 10.3. «Технологии атомизации для получения мелкодисперсных высококачественных порошков сплавов на различной основе для аддитивных технологий и порошков припоев для пайки» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1, 2].

Материалы и методы

Металлопорошковые композиции из титановых сплавов ВТ6 и ВТ20 получены методом бестигельной плавки и газовой атомизации во ФГУП «ВИАМ» на установке ВИПиГР 50/500. Химический состав исходных горячекатаных прутков (Ø80 мм) из сплавов ВТ6 и ВТ20 удовлетворял требованиям ОСТ1 90013–81.

После получения металлопорошковых композиций с помощью аэродинамического классификатора отделяли фракцию 10 мкм. Рассев металлопорошковых композиций проводили на ситовом анализаторе с использованием основных сеток №008 и №004 по ГОСТ 6613. В результате получены металлопорошковые композиции трех фракций, мкм: 10–40; 40–80; 10–80.

Для полученных трех фракций определяли следующие технологические характеристики металлопорошковых композиций: насыпную плотность (г/см^3), угол естественного откоса, текучесть, а также вытянутость, коэффициент сферичности, морфологию частиц и газовую пористость.

Насыпную плотность порошковых материалов определяли по методике, описанной в ГОСТ 19440–94.

Определение параметра формы гранул порошка проводили через параметр формы круга. Параметр формы для круга равен 3,54. Отношение периметра гранулы к корню квадратному из ее площади – показатель сложности формы гранулы: чем больше параметр формы, тем сложнее форма частицы.

Исследования проводили на инвертированном металлографическом микроскопе DM IRM фирмы Leica при увеличении $\times 200$. Съёмку изображений вели при помощи цифровой камеры VEC-335. Подготовку изображений к количественному анализу и их математическую обработку выполняли в программном комплексе Image Expert Pro 3х.

Количественный анализ гранул порошка проводили, анализируя несколько полей зрения для каждого образца. Выборка составляла не менее 100 гранул из каждой фракции. Закрашивание гранул порошка проводили в полуавтоматическом режиме, анализируя только те гранулы, которые видны на изображении полностью, без дефектов и перекрытий.

Морфологию частиц (гранул) металлопорошковых композиций из сплавов ВТ6 и ВТ20 (фракция 10–80 мкм) исследовали на сканирующем электронном микроскопе FEI Verios 460.

Количественный анализ проводили, анализируя не менее 150 гранул порошка из каждой фракции. Объемную долю пор рассчитывали по формуле:

$$\text{Объемная доля пор} = \frac{\text{концентрация пор}}{\text{концентрация гранул} + \text{концентрация пор}} \cdot 100\%.$$

Текучесть порошковых материалов определяли по методике, описанной в ГОСТ 20899–98, с помощью воронки Холла с отверстиями диаметром 2,5 и 5,0 мм по ASTM В 213-11 (Ф2,5) и ASTM В 964-16 (Ф5,0).

Результаты

Определены параметры формы частиц металлопорошковых композиций из титановых сплавов ВТ6 и ВТ20. По результатам металлографических исследований установлено, что частицы имеют в основном правильную форму с высоким коэффициентом сферичности (табл. 1) и ровной поверхностью (рис. 1). На отдельных гранулах имеются сателлиты, встречаются частицы неправильной формы, что отражается в значении параметра вытянутости, превышающем 1. Гранулы имеют дендритное строение (рис. 1).

Таблица 1

Результаты определения параметров формы гранул порошка из сплавов марок ВТ6 и ВТ20

Фракция металлопорошковой композиции, мкм	Количество измерений, шт.	Вытянутость	Параметр формы	Отклонение от сферичности
Сплав марки ВТ6				
10–40	250	1,08±0,01	3,78±0,016	0,936
40–80	205	1,10±0,01	3,81±0,015	0,929
10–80	162	1,12±0,01	3,88±0,013	0,912
Сплав марки ВТ20				
10–40	164	1,08±0,01	3,79±0,016	0,934
40–80	203	1,11±0,01	3,81±0,015	0,929
10–80	251	1,13±0,01	3,88±0,016	0,912

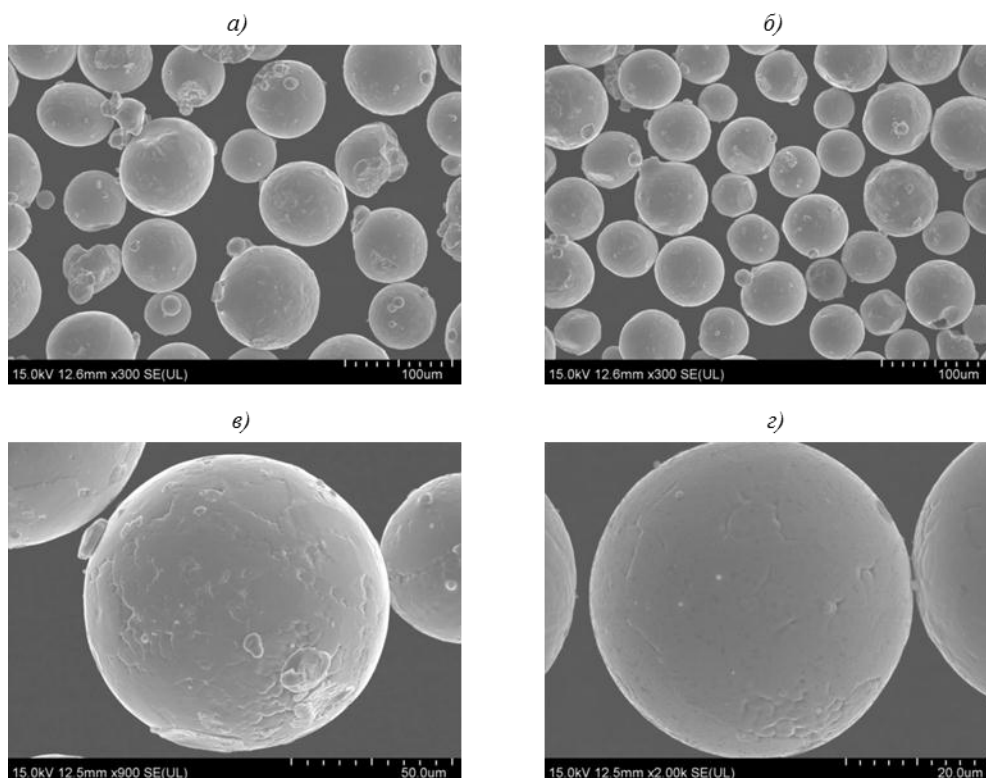


Рис. 1. Внешний вид (РЭМ) гранул фракции 10–80 мкм из сплавов ВТ6 (а – ×300; е – ×900) и ВТ20 (б – ×300; з – ×2000)

Пористость в металлопорошковых композициях из сплавов марок ВТ6 и ВТ20 идентична, поэтому в данной статье приведены поля зрения для сплава ВТ6, количественный анализ микропор представлен в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты количественного анализа образцов металлических порошков
из сплава марки ВТ6**

Фракция металлопорошковой композиции, мкм	Количество обработанных полей зрения <i>N</i> , шт.	Количество анализируемых гранул	Количество гранул с порами	Концентрация гранул на <i>N</i> полей зрения, %	Концентрация пор на <i>N</i> полей зрения, %	Объемная доля пор, %
10–40	19	372	25	14,74	0,38	2,51
40–80	42	360	56	24,20	0,81	3,24

Результаты количественного анализа гранул порошка каждой фракции и фотографии исходных полей зрения и полей зрения с выделенными синим цветом анализируемыми гранулами представлены на рис. 2–4.

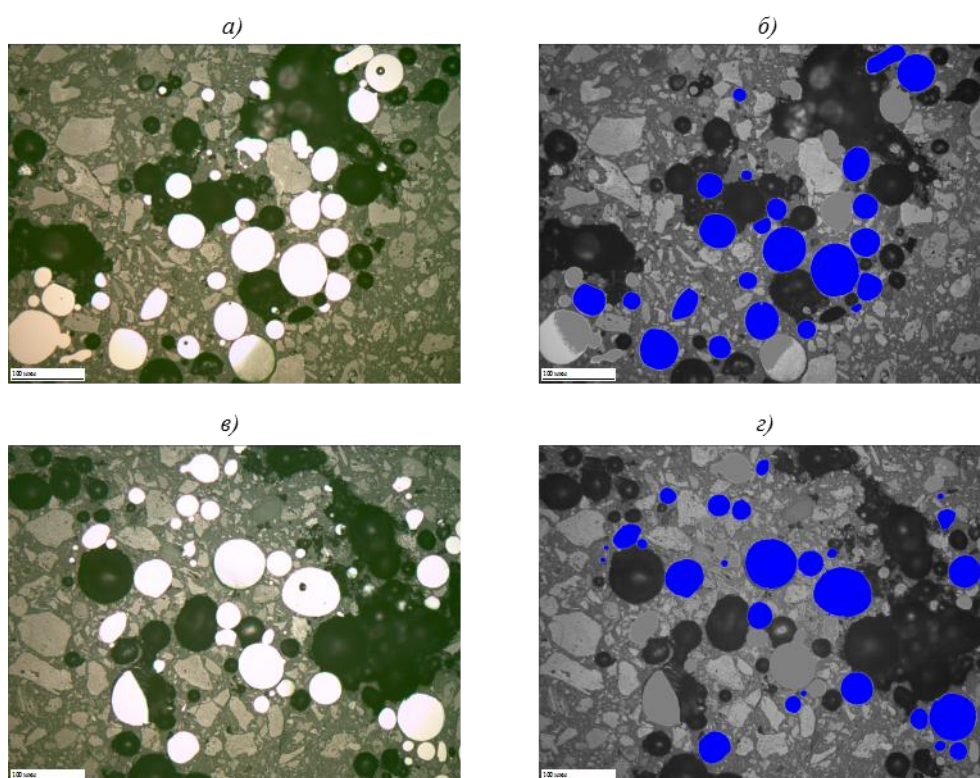


Рис. 2. Изображения гранул порошка из сплава ВТ6 фракции 10–80 мкм при увеличении $\times 200$ (а, е) и изображения, подготовленные к количественному анализу (б, з) (анализируемые гранулы выделены синим цветом)

Наибольшая объемная доля пор наблюдается для фракции размером 40–80 мкм и составляет 3,24%, а минимальная – для фракции 10–40 мкм: 2,51%.

Остаточная газовая (аргонная) пористость характерна для порошков, полученных газовой атомизацией, так как при дроблении струи жидкого металла потоком аргона фрагменты расплава под действием сил поверхностного натяжения формируют капли сферической формы, но в процессе схлопывания стенок капли локальный объем аргона может быть изолирован внутри гранулы. Для металлических порошков, используемых в аддитивных технологиях, наличие закрытой газовой пористости не является критичным, так как при сплавлении газ выходит из металла, и в научно-технической литературе не встречается данных о наличии именно аргонной пористости в конечных изделиях.

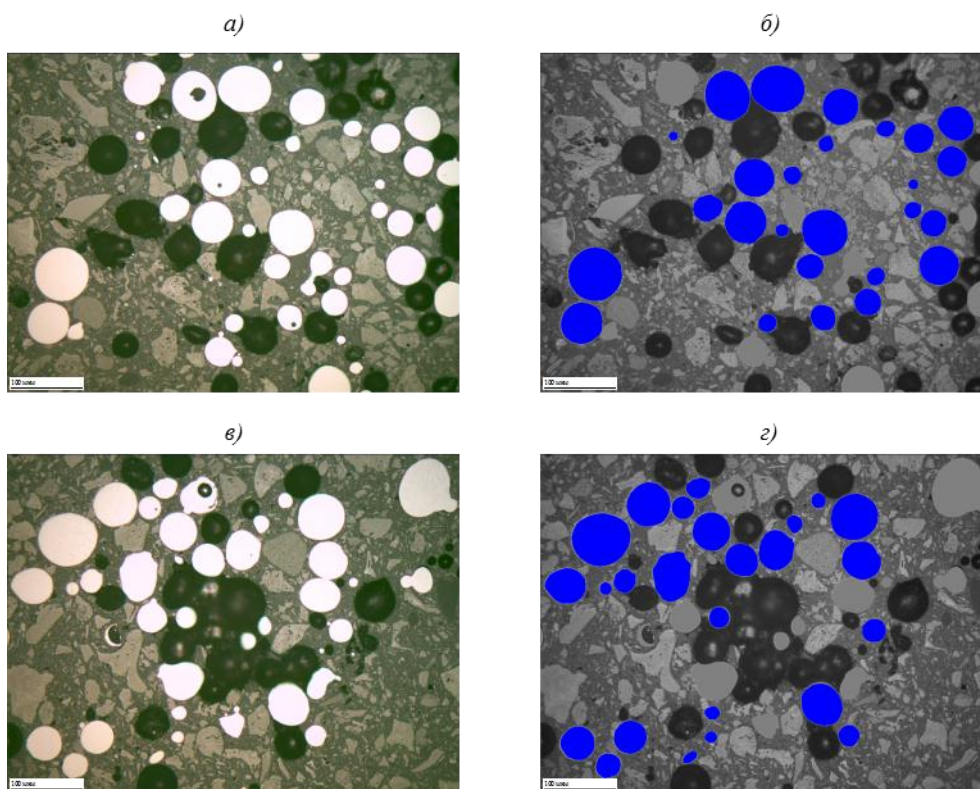


Рис. 3. Изображения гранул порошка из сплава марки ВТ6 фракции 40–80 мкм при увеличении $\times 200$ (а, е) и изображения, подготовленные к количественному анализу (б, з) (анализируемые гранулы выделены синим цветом)

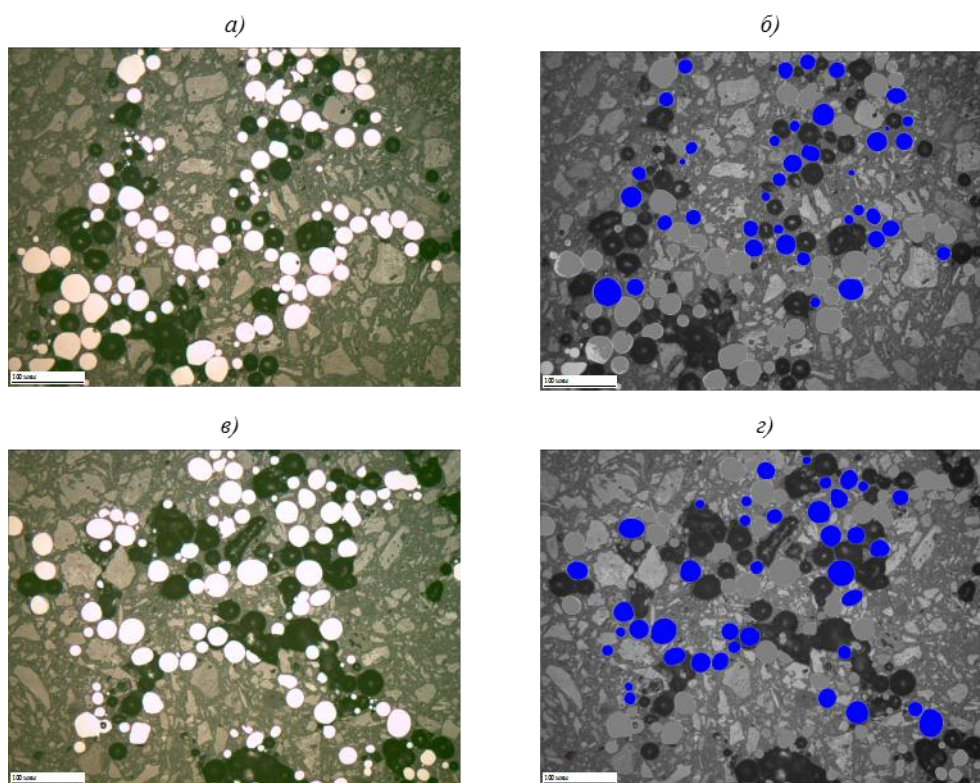


Рис. 4. Изображения гранул порошка из сплава ВТ6 фракции 10–40 мкм при увеличении $\times 200$ (а, е) и изображения, подготовленные к количественному анализу (б, з) (анализируемые гранулы выделены синим цветом)

Средние значения насыпной плотности и угла естественного откоса представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Результаты определения угла естественного откоса и насыпной плотности
для сплавов марок ВТ6 и ВТ20**

Фракция металлопорошковой композиции, мкм	Угол естественного откоса α , град, для сплава		Насыпная плотность $g_{\text{нас}}$, г/см ³ , для сплава	
	ВТ6	ВТ20	ВТ6	ВТ20
10–40	46	47	2,25	2,26
40–80	38	38	2,39	2,40
10–80	34	34	2,41	2,42

По ГОСТ 18318–94 насыпная плотность ($g_{\text{нас}}$) – объемная характеристика порошка, которая представляет собой массу единицы его объема при свободной насыпке. Ее величина зависит от плотности упаковки частиц порошка при свободном заполнении ими какого-либо объема. Она тем больше, чем крупнее и более правильной формы частицы порошка и чем больше их пикнометрическая плотность (количество массы, приходящейся на единицу объема). Наличие выступов и неровностей на поверхности частиц, а также увеличение поверхности в связи с уменьшением размера частиц, повышает межчастичное трение, что затрудняет их перемещение относительно друг друга и приводит к снижению насыпной плотности.

Следует отметить, что для исследованных металлопорошковых композиций из сплавов марок ВТ6 и ВТ20 насыпная плотность практически одинакова благодаря практически одинаковой плотности сплавов: 4,43 и 4,45 г/см³ соответственно, а также близкой морфологии частиц, которая в основном определяется способом их получения. Из данных табл. 3 следует, что частицы порошка размером 10–40 мкм имеют наименьшую насыпную плотность. Более широкий фракционный состав (10–80 мкм) приводит к более плотной упаковке частиц, так как более мелкие заполняют пустоты, образующиеся при упаковке более крупных.

Угол естественного откоса образуется поверхностью конуса свободно насыпанного порошка и горизонтальной плоскостью в его основании. Таким образом, угол естественного откоса является также и углом трения. Эта характеристика имеет большое значение при конструировании пересыпных устройств, питателей и заполнении разнообразных форм. Данный угол, очевидно, зависит от состояния поверхности частиц, формы и влажности.

Результаты исследований металлопорошковых композиций показали, что наименьший угол естественного откоса получен для металлопорошковых композиций фракции 10–80 мкм. Высокие значения угла естественного откоса (оптимальными являются значения 21–28 град) связаны как с состоянием поверхности – шероховатостью и наличием сателлитов, так и с наличием большого количества мелкодисперсных фракций.

Текучесть металлопорошковых композиций определяли с помощью воронки Холла с диаметрами отверстий 2,5 и 5,0 мм. Полученные значения текучности металлопорошковых композиций из сплавов марок ВТ6 и ВТ20 представлены в табл. 4.

Текучесть металлопорошковых композиций из сплавов ВТ6 и ВТ20

Фракция металлопорошковой композиции, мкм	Текучесть, с (не более), для сплава			
	ВТ6		ВТ20	
	при диаметре воронки, мм			
	5,0	2,5	5,0	2,5
10–40	11,2*	Не течет	11,4*	Не течет
40–80	5,5	24,8	5,7	25,0
10–80	10,8	27,8	10,9	28,0

* С однократной инициацией.

Текучесть порошка характеризует его способность с определенной скоростью вытекать из отверстий, что очень важно для распределения порошка по поверхности нанесения материала, его подачи по металлопроводам определенного проходного сечения и дозирования при подаче.

Текучесть порошка обычно уменьшается, а время истечения возрастает при увеличении удельной поверхности и шероховатости частиц, а также при усложнении их формы, так как при этом затрудняется относительное перемещение частиц. Окисление в большинстве случаев повышает текучесть порошка в связи с уменьшением коэффициента трения и сглаживанием рельефа поверхности частиц. Значительно снижает текучесть влажность порошка.

В данном случае, поскольку металлопорошковые композиции получены в одинаковых условиях, на одной установке и, таким образом, на различиях в результатах сказывается более развитая поверхность частиц фракции 10–40 мкм по сравнению с частицами фракции 40–80 мкм, так как объем поверхности возрастает при уменьшении размера, а это увеличивает силу трения при движении частиц. Развитая поверхность мелких частиц конденсирует большее количество влаги, что значительно снижает текучесть порошковых композиций.

В целом текучесть изучаемых металлопорошковых композиций можно охарактеризовать как невысокую в сравнении, например, с композициями, получаемыми методом PREP (Plasma Rotating Electrode Process) [16], что связано как с особенностями частиц, полученных газовой атомизацией (наличие сателлитов, развитая поверхность), так и главным образом большим количеством мелкодисперсных фракций.

Обсуждение и заключения

Проведены исследования технологических свойств и морфология металлопорошковых композиций из сплавов марок ВТ6 и ВТ20, полученных во ФГУП «ВИАМ» на установке ВИПиГР 50/500.

Вытянутость частиц для металлопорошковых композиций лежит в диапазоне значений 1,08–1,13, а параметр формы равен 3,78–3,88, что свидетельствует о преимущественно правильной форме частиц с высоким коэффициентом сферичности и ровной поверхностью. На отдельных гранулах имеются сателлиты, встречаются частицы неправильной формы. В целом форма и дефекты частиц сплавов марок ВТ6 и ВТ20 являются характерными для композиций, полученных методом газовой атомизации.

Остаточная пористость металлопорошковых композиций может достигать от 1,66 до 3,24% в зависимости от фракции, однако при изготовлении деталей методами аддитивных технологий аргон выходит из металла и, таким образом, данная особенность не оказывает негативного влияния на свойства конечного изделия.

Исследования показали, что технологические свойства изученных металлопорошковых композиций из сплавов марок ВТ6 и ВТ20 удовлетворительные из-за

развитой поверхности, наличия сателлитов и присутствия востребованных в аддитивных технологиях мелкодисперсных фракций 10–63 мкм, которые склонны к насыщению влагой и слипанию между собой. Наиболее высокие технологические свойства показали металлопорошковые композиции фракций 40–80 и 10–80 мкм.

Как правило, металлопорошковые композиции, полученные по разным технологиям, обладают разными технологическими свойствами и в свою очередь установки для аддитивных технологий имеют различные требования по используемым материалам. В связи с этим материалы для аддитивных технологий выбирают экспериментальным путем (проводя исследования) с учетом технологических свойств конкретной металлопорошковой композиции и возможной последующей корректировкой металлопорошковых композиций – например, гранулометрического состава, изменение которого отразится на технологических свойствах.

ЛИТЕРАТУРА

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 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 7–17.
3. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения // *Защита и безопасность*. 2014. №4. С. 28–29.
4. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 157–167.
5. Каблов Е.Н. Материалы и технологии ВИАМ для «Авиадвигателя» // *Пермские авиационные двигатели: информ. бюл.* 2014. №31. С. 43–47.
6. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 19–36.
7. 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.
8. Магеррамова Л.А., Ножницкий Ю.А., Васильев Б.Е., Кинзбургский В.С. Применение аддитивных технологий для изготовления деталей перспективных газотурбинных двигателей // *Технология легких сплавов*. 2015. №4. С. 7–13.
9. Зленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М. Аддитивные технологии в машиностроении. Пособие для инженеров. М.: НАМИ, 2015. С. 34–44.
10. Шейхалиев Ш.М., Шемякина О.А. Новости порошковой металлургии. НЕТРАММ и РСТ // *Журнал Весна*. 2016. №6. С. 1–4.
11. Дудихин Д.В., Сапрыкин А.А. Способы получения сферических порошков для аддитивных лазерных технологий // *MASTER'S JOURNAL*. 2016. №1. С. 51–55.
12. Манцевич Н.М. Исследовательская база получения металлических порошков для аддитивных технологий. М.: АТОМЭКСПО, 2015. С. 6–8.
13. Довбыш В. М., Забеднов П.В., Зленко М.А. Аддитивные технологии и изделия из металла. М.: НАМИ, 2015. С. 29–31.
14. 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. P. 137–164.
15. ASTM B213. Standard Test Methods for Flow Rate of Metal Powders Using the Hall Flowmeter Funnel.
16. Князев А.Е. Производство гранул титанового сплава Ti–6Al–4V // *Технология легких сплавов*. 2010. №4. С. 46–48.