

DOI: 10.155-93/2224-9877/2017.4.09

УДК 621.762.222

С.А. Оглезнева, А.А. Сметкин, В.И. Митин, К.В. КалининПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ АТОМИЗАЦИИ РАСПЛАВА
НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРОШКА
МАРКИ 12X18H10T**

Цель работы – изучение влияния параметров распыления расплавов на основе железа на физические и технологические характеристики порошков, предназначенных для селективного лазерного сплавления.

Для изготовления металлического порошка марки 12X18H10T была использована технология газовой атомизации жидкого расплава аргоном на лабораторном атомайзере VIGA-2B при температуре 1640 °С. При получении порошков расход газа варьировали изменением диаметра металлопровода и типа сопла форсунки отличающихся конструкцией.

Установлено, что при увеличении диаметра металлопровода уменьшались значения текучести, доли частиц с сателлитами, доля сферических частиц, но при этом повышалось количество целевой фракции и уменьшалась доля частиц с порами. Значения диаметра Фере, среднего размера частиц d_{50} , пикнометрической плотности и насыпной плотности изменились незначительно.

Установлено, что при использовании форсунки Standart характеристики порошков были хуже, чем при применении форсунки SuperSonic: повышались значения доли частиц с порами, доли частиц с сателлитами, снижалось значение сферических частиц, а текучесть совсем отсутствовала, но при этом было самое высокое значение целевой фракции.

Установлена экспериментальная зависимость увеличения выхода целевой фракции (20–63 мкм) порошка при уменьшении объема подачи распыливающего газа. Представлены зависимости количества порошка целевой фракции и отношения размеров частицы и диаметра отверстия металлопровода от объема подачи распыливающего газа. Полученные данные позволяют прогнозировать величины выходных параметров порошков при атомизации стали 12X18H10T. Характеристики порошков позволяют использовать их для изготовления изделий аддитивными технологиями.

Ключевые слова: порошок, технологические свойства, форма частиц, давление газа, аддитивные технологии, конструкция сопла форсунки, сталь, газовая атомизация, целевая фракция, атомайзер VIGA-2B.

S.A. Oglezneva, A.A. Smetkin, V.I. Mitin, K.V. Kalinin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**INFLUENCE OF PARAMETERS OF MELTING ATOMIZING
TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE POWDER
OF THE BRAND 12X18H10T**

The aim of this work is to study the influence of the parameters of sputtering of melts based on iron on the physical and technological characteristics of powders intended for selective laser fusion.

For the production of metal powder 12X18H10T, the technology of gas atomization of liquid melt with argon on a laboratory atomizer VIGA-2B was used at a temperature of 1640 °C. In the production of powders, the gas flow rate was varied by changing the diameter of the metal pipe and the nozzle nozzle type differing in design.

It was found that as the diameter of the metal pipe increased, the values of fluidity, the fraction of particles with satellites, the fraction of spherical particles decreased, but the amount of the target fraction increased and the fraction of particles with pores decreased. Values of Fere diameter, average particle size d_{50} , pycnometric density and bulk density have changed insignificantly.

It was found that when using the "Standart" nozzle, the characteristics of the powders were worse than when using the "SuperSonic" nozzle – the values of the fraction of particles with pores, the fraction of particles with satellites increased, the value of spherical particles decreased, and the fluidity was completely absent, but it was the highest target fraction value

The experimental dependence of the increase in the yield of the target fraction (20-63 μm) of the powder is established with a decrease in the volume of supply of the atomizing gas. Dependences of the amount of the target fraction powder and the ratio of the particle size and the diameter of the metal orifice to the spraying gas supply volume are presented. The data obtained make it possible to predict the values of the output parameters of powders during the atomization of 12X18H10T steel. The characteristics of the powders make it possible to use them for the manufacture of articles by additive technologies.

Keywords: powder, technological properties, particle shape, gas atomization parameters, additive technologies, nozzle design, steel, gas atomization, target fraction, VIGA-2B atomizer.

Введение

Развитие технологической инновационной деятельности авиационной, оборонной промышленности, машиностроения, химического производства и др. в последние годы тесно связано с развитием аддитивных технологий, применение которых позволит снизить расход материалов, затрачиваемых на изготовление деталей, до 10 раз. Однако данное производство необходимо обеспечить исходными материалами – высококачественными порошками. К сожалению, с середины 80-х годов прошлого века в России активные исследования и разработки в сфере технологий и методов получения распыленных порошков практически не проводились, всё это время в мире сфера аддитивного производства непрерывно развивалась. Высокая стоимость импортных металлических порошков и санкционная политика в отношении России сдерживают развитие аддитивного производства в стране, так как большинство зарубежных компаний не продает свои технологии, даже в качестве лицензий. В связи с этим развитие научно-технических основ получения качественных отечественных порошков является актуальной задачей.

Одним из распространенных видов производства изделий из порошков аддитивными технологиями является производство деталей методом селективного лазерного спекания металлических порошков (SLS – Selective Laser Sintering). Существенным препятствием для бо-

лее широкого внедрения данной технологии является высокая стоимость используемых порошков, обусловленная жесткими требованиями по гранулометрическому составу и форме частиц порошков. В последние годы появилось большое количество работ, посвященных технологии селективного лазерного сплавления в нашей стране для производства изделий различного назначения: для создания композитных материалов [1, 2], в медицине [3], при производстве моделей и литейных форм [4], в машиностроении, авиационной и аэрокосмической отраслях [5–7].

Порошки для селективного лазерного сплавления (СЛС) должны удовлетворять специальным требованиям [8]. Во-первых, содержать минимальное количество примесей в химическом составе. Во-вторых, для обеспечения высокого качества спеченной детали требуются дисперсные порошки определенного гранулометрического состава с узким диапазоном размеров частиц. Наличие частиц с существенно различными размерами приведет к неравномерному нагреву разных частиц и испарению самых мелких с образованием пор. Необходимость в высокой дисперсности обусловлена тем, что чем мельче исходные порошки, тем выше механические и электрические свойства спеченных образцов. В-третьих, технология селективного лазерного спекания предполагает послойное спекание микропорошка, что объясняет повышенные требования к текучести и насыпной плотности материала, а следовательно, к форме частиц материала. Метод СЛС использует технологию послойного спекания, и если материал не будет обладать необходимой текучестью и насыпной плотностью, то будут образовываться поры в нанесенном слое (из-за недостатка материала), ухудшающие физико-механические свойства всего изделия. Внутренняя пористость также способствует неравномерному прогреву частиц и внесению дополнительной пористости в материал.

Основные параметры, по которым оценивают частицы порошка, – это текучесть, наличие внутренней пористости, наличие сателлитов частиц, сферичность частиц, пикнометрическая плотность, насыпная плотность. Также порошки классифицируют по размеру частиц. Одним из важных параметров, описывающих размеры частиц порошка, является значение d_{50} – «средний диаметр частиц» [9]. Так, например, если $d_{50} = 35$ мкм, то это означает, что у 50 % частиц порошка размер частиц меньше или равен 35 мкм. Этот параметр крайне важен, так как

в разных аддитивных установках необходимо использовать порошки с определенным размером частиц. И если d_{50} окажется меньше или больше, чем необходимо, то на установке невозможно будет получить изделие с необходимыми параметрами.

Для изготовления порошков, обладающих необходимыми свойствами для СЛС, целесообразно использовать метод газового распыления жидкого расплава. Этот метод универсален с точки зрения возможности получения порошков различных материалов, мобилен (возможность быстрого переориентирования производства), позволяет переключаться на получение порошков различных материалов, имеет высокую производительность, возможность автоматизации, а также дает возможность контроля гранулометрического состава получаемого материала [8].

Принцип газовой атомизации заключается в распаде расплава под потоком газообразной среды (воздуха, азота, гелия или аргона), истекающей из сопла под давлением. Основное преимущество газового распыления расплавов – возможность получения однородных порошков сферической формы с необходимым уровнем технологических свойств.

Механизм формирования частиц в процессе распыления газом расплава, предложенный Домбровским и Джонсом, происходит в три этапа. На первом этапе формируются синусоидальные волны в слое расплава, быстро возрастает их амплитуда. На втором этапе эти волны разбиваются вследствие распада и формируются отдельные капли в третьей фазе.

На средний размер и форму образующихся частиц влияют мощность и температура газового потока, диаметр струи, температура, поверхностное натяжение и вязкость расплава. Кроме того, очень важно, в какой среде производят распыление, а также конструктивное оформление форсуночного устройства. В качестве газа используют инертный газ (азот, аргон, гелий) или воздух.

Форсунки, применяемые в газовой атомизации, имеют на сегодняшний день гораздо более широкий диапазон конструкций, чем форсунки, используемые при распылении расплавов водой.

Объем газа, подаваемого через сопло, определяется размером воздушного зазора, давления и температуры газа. Скорость потока металла и полученный размер частиц порошка связаны с силой аспира-

ции, соплом, диаметром отверстия и расстоянием по вертикали между соплом и уровнем расплавленного металла.

Самая простая конструкция форсуночного устройства обеспечивает возможность пропускания струи металла в свободном падении на горизонтальную газовую струю. Газ подается через кольцевое отверстие вокруг сопла под сходящимся углом. Такая конструкция может работать как в вертикальном, так и в горизонтальном положении. Однако требуется тщательное проектирование форсунки для исключения замерзания металла в газовой струе, которое может привести к затвердеванию расплава на кончике сопла [10]. Используются также конструкции газовых форсунок, которые классифицируются как форсунки «свободного падения», замкнутого типа или «моноблочные» и внутреннего смешивания.

Для распыления газом «свободно падающего» расплава ключевой процесс аналогичен распылению водой. Этот метод прост в эксплуатации, но неэффективен и не подходит для производства тонких порошков. В форсунке типа «внутреннего смешивания» происходит перемешивание газа и жидкого металла до выхода из распылительной камеры [11].

Конструкция сопла замкнутого типа обеспечивает повышение выхода порошка со средним размером частиц 40–60 мкм при максимальной скорости и плотности газа в области контакта со струей металла [12]. Однако использование форсунки такого типа может привести к замораживанию расплавленного металла на конце сопла, который сразу же остановит процесс распыления.

Средний размер частиц порошков, распыленных газом, колеблется от 10 до 500 мкм. Распределение размеров частиц соответствует нормальному логарифмическому, со стандартным отклонением для газового распыления обычно в пределах 2,2–2,4 – почти в таких же пределах, как при водном распылении, но шире чем при центробежном распылении. В зависимости от размеров частиц и используемого газа скорости охлаждения меняются от 10^3 до 10^5 К/с – меньше, чем при распылении водой, но такие же, как при центробежном распылении. Размер частиц порошка больше зависит от объема подаваемого на распыление газа, чем от давления или другого параметра. При распылении газом размер частиц D определяют из зависимости $D = \frac{K}{\sqrt{F}}$, где K за-

висит от конструкции сопла и свойств сплава, а F – это отношение газ/металл, м³/кг. Многочисленными экспериментами установлено, что средний размер образующихся частиц быстро уменьшается с повышением скорости истечения газа-энергоносителя из форсунки с расширяющимся соплом или при повышении давления дутья в форсуночных устройствах с сужающимся соплом.

В последнее время разрабатываются распылительные форсунки со сверхзвуковым истечением газа. Такие форсунки позволяют получать мелкие порошки меди, цинка, стали. Однако разработка конструкций таких форсунок требует детального исследования различных конструктивных и технологических параметров.

Таким образом, сумма расхода газа Q зависит от давления газа, температуры и сечения сопла. Для идеальных условий и нулевой скорости на входной стороне сопла газовый поток может быть выражен как [13]

$$Q = \omega \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} g \frac{p\sqrt{2g}}{\sqrt{RT}}, \quad (1)$$

где ω – поперечное сечение газового сопла на выходе; k – соотношение коэффициентов теплоемкости при постоянных давлении и объеме, $k = c_p/c_v$; p – давление газа в резервуаре; g – ускорение свободного падения; R – газовая постоянная; T – температура газа в резервуаре. Для азота $k = 1,4$.

Для оценки эффективности газа можно использовать сравнение на основе того, сколько порошка формируется за единицу использованного газа. Такой расчетный критерий годится при высоком потреблении газа в производстве тонких порошков. Конструкции сопла замкнутого типа в сопоставлении с потреблением газа обеспечивают более высокую эффективность при сопоставимом соотношении газа и металла [14].

Удельный расход газа также является важным параметром процесса управления средним размером частиц при ультразвуковой газовой атомизации [15, 16]. Для алюминиевого сплава при фиксированном давлении распыляемого газа среднее значение диаметра может варьироваться от 250 до 50 мкм при увеличении отношения массового расхода газа к металлу от 0,3 до 2,0. Уменьшение среднего размера также прогнозируется с ростом давления газа.

В работе [17] на основе опубликованных данных о порошках, распыленных газом, предложено эмпирическое уравнение для среднего размера частиц δ_m (уравнение Н. Lubanska):

$$\frac{\delta_m}{d_0} = K \left[\frac{v_m}{v_g} \frac{1}{We} \left(1 + \frac{M}{A} \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где δ_m – медиана; d_0 – диаметр струи расплава; K – константа; v_m – кинематическая вязкость жидкого металла; v_g – кинематическая вязкость распыляемой среды; We – число Вебера; M/A – скорость потока газа.

Целью работы является исследование влияния параметров газовой атомизации на структурно-фазовый состав, микроструктуру, физические, химические, технологические свойства порошков, полученных из сплава 12X18H10T.

Методики эксперимента и исследования

Распыление расплавов производили на установке VIGA-2B (ALD, Германия), позволяющей получать порошки металлов и сплавов с температурой плавления до 1700 °С, с размерами 30–80 мкм, низким содержанием кислорода и азота: никелевые жаропрочные сплавы (In718, Rene88) для порошковых деталей авиационных и стационарных турбин, сплавы на основе кобальта для использования в медицине, стоматологии и производстве мишеней ионного распыления, высоколегированные стали (инструментальные, быстрорежущие) с очень высоким содержанием карбидов.

В экспериментальных испытаниях для получения порошков сплава на основе железа были задействованы два типа сопла форсунки:

1) с параллельными стенками, образующими щель сопла (Standart, рис. 1, а);

2) с расширяющимися стенками, по типу «сопла Лавалья» (SuperSonic, рис. 1, б).

Ширина щели форсунки Standart варьировалась в пределах значений 0,6–0,75 мм.

Ширина щели форсунки SuperSonic варьировалась в пределах значений 0,6/1,15 мм (h_1/h_2 , где h_1 – ширина узкой части; h_2 – ширина широкой части на срезе выхода сопла).

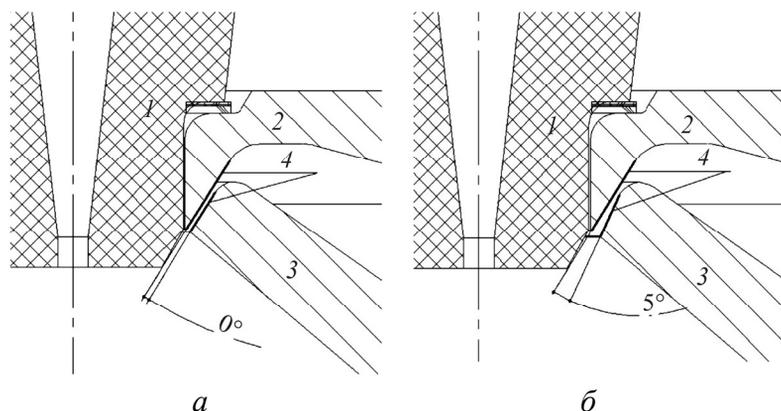


Рис. 1. Сопло форсунки: *а* – Standart, *б* – SuperSonic; 1 – металлопровод; 2 – верхняя плита форсунки; 3 – нижняя плита форсунки; 4 – поверхности, образующие щель сопла форсунки

Изменение ширины щели форсунки позволило увеличить расход распыляющего газа и тем самым изменить соотношение объемов газа и металла.

Диспергирование сплава 12X18H10T производили при температуре 1640 °С, расход аргона (860 ± 200) м³/ч (табл. 1).

Таблица 1

Параметры режимов атомизации для сплавов при температуре 1640 °С

Номер режима	Тип сопла	Диаметр металлопровода, мм	Расход газа, м ³ /ч
1	SuperSonic	3	1026–766
2	SuperSonic	4	842–832
3	SuperSonic	5,5	860–630
4	Standart	5,5	860–630

Отбор проб экспериментальных порошков после каждого режима атомизации выполнен согласно ГОСТ 23148–78 при комнатной температуре. Содержание N₂, H₂, O₂ определяли на анализаторах Flash 2000 и АК-7716 (ГОСТ 17145–90, 27417–87); содержание легирующих элементов – на рентгеновском энергодисперсионном спектрометре EDX 800HS Shimadzu (ГОСТ 18895–81); морфологию частиц, внутреннюю пористость и сателлиты исследовали на шлифах с помощью оп-

тического микроскопа Axiovert 40 MAT (ГОСТ 23402–78, 25849–81, 1778–70), данные количественной металлографии обрабатывали с помощью программы «ВидеоТест 4»; гранулометрический состав определяли ситовым методом (ГОСТ 18318–94), а также на лазерном анализаторе размера частиц Analyzette 22 NanoTec (ГОСТ 2266–77); фазовый состав порошков изучали с помощью дифрактометра XRD-6000 Shimadzu; измерение микротвердости проводили на приборе Micro-Vickers Hardness Tester 402 MVD (Wolpert Wilson Instruments) при нагрузке 25 г (ГОСТ 9450–76). У порошков определяли также текучесть (ГОСТ 20899–98), пикнометрическую плотность ($\gamma_{\text{пикн}}$) (ГОСТ 2266–77), насыпную плотность ($\gamma_{\text{нас}}$) с помощью воронки Холла (ГОСТ 19440–94), плотность утряски (ГОСТ 25279–98).

Размер частиц оценивали по диаметру Фере (расстояние между касательными к контуру изображения, проведенными параллельно направлению просмотра) (<http://www.videotest.ru>); используется для характеристики размеров элементов любой формы.

Размеры пор измеряли на шлифах частиц в соответствии с ГОСТ 21073.2–75 и 1778–70. Шлифы готовили из препарата, полученного путем перемешивания частиц с эпоксидной смолой после полимеризации смолы. Определяли также долю частиц на шлифе, содержащих поры, путем вычисления отношения пористых частиц к общему числу частиц. Определяли сателлитность как среднее число сателлитов в поле зрения шлифа с частиц, приходящихся на число частиц в поле зрения шлифа. Измерения проводили по нескольким полям, содержащим не менее 50 частиц.

Результаты и обсуждение

Частицы, полученные при различных режимах распыления с использованием форсунки SuperSonic (режимы 1–3), отличаются формой и количеством сателлитов (рис. 2). Так, частицы от режима 1 (рис. 2, а) обладают сферической формой, определяемой визуально и подтверждаемой данными измерений: согласно рис. 2 и табл. 2 диаметр Фере частиц по этому режиму самый большой, равный 1,0, а также самая высокая доля сферических частиц – 90 %. Высокое содержание сферических частиц обусловлено также и показателем сателлитности – у частиц по режиму 1 он самый низкий (см. табл. 2), визуально частицы с сателлитами наблюдаются в единичных случаях.

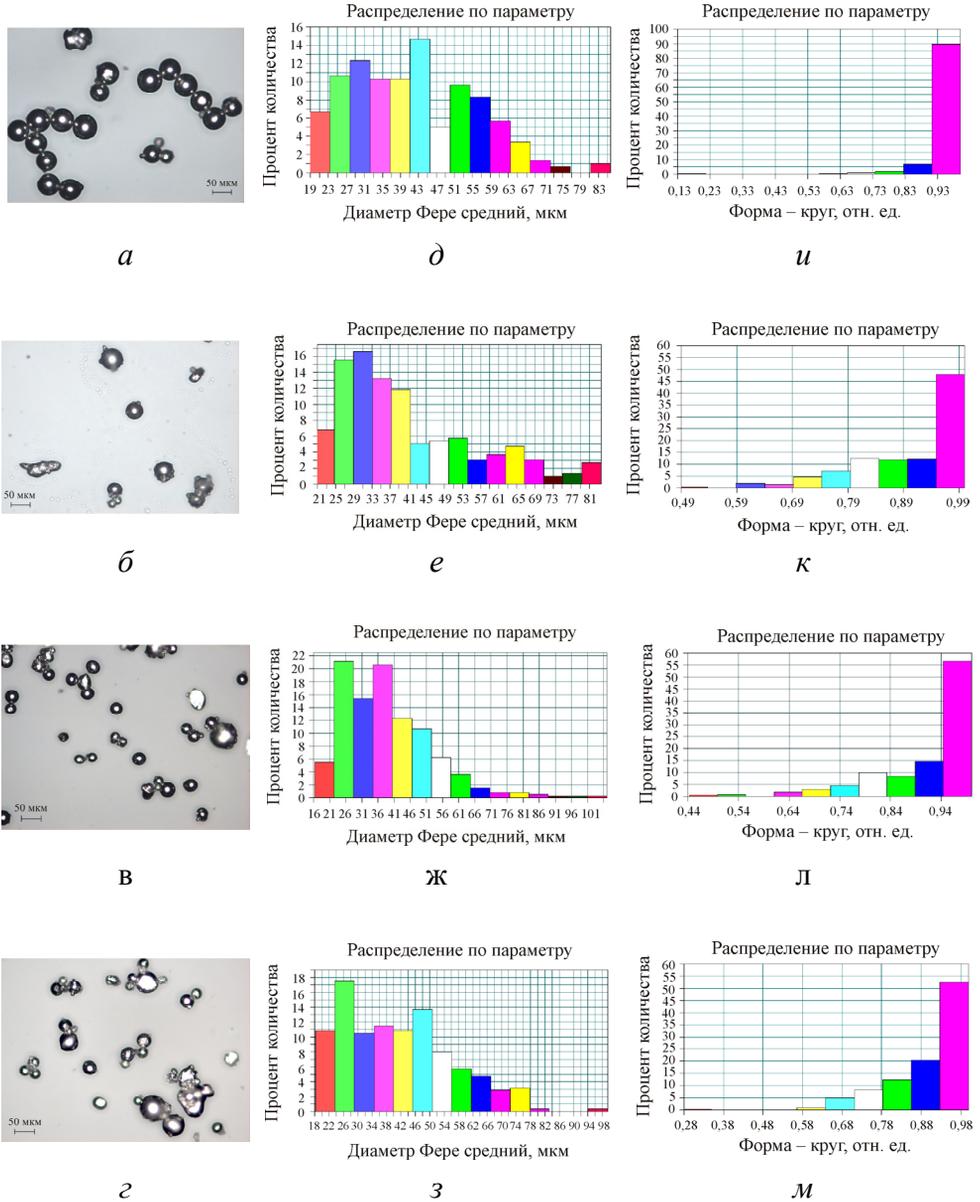


Рис. 2. Фотографии частиц фракции 20–63 мкм, полученных по режимам 1–4 (а–г); гистограммы распределения частиц по размерам частиц (д–з) (режимы 1–4); фактор формы частиц (и–м) (режимы 1–4)

Таблица 2

Характеристики порошков, полученных по разным режимам

Номер режима	Текучесть, 50 г/с	Целевая фракция, %	Доля частиц с порами, %	Доля частиц с сателлитами, %	Фактор формы (круг)	Доля сферических частиц, %	$d_{ср}$, мкм	d_{50} , мкм	$\gamma_{плкн}$, г/см ³	$\gamma_{нас}$, г/см ³
1	3,27	40,8	47	2	1,0	90	40 ± 13	41	3,6	4,41
2	2,33	41,2	82	12	0,94	45	36 ± 15	36	3,73	3,87
3	2,57	44,7	17	13	0,966	55	37 ± 13	37	3,64	4,03
4	0	50,8	35	19	0,94	52	40 ± 15	40	3,05	3,78

Анализ результатов формы частиц, полученных по режимам 2 и 3, показал большое количество частиц неправильной формы, наблюдаемое визуально (рис. 2, б, в) и подтвержденное результатами измерений (см. рис. 2, к, л, табл. 2): фактор формы 0,94 и 0,96 соответственно, а доли сферических частиц 45 и 55 % соответственно.

Использование форсунки Standart (режим 4) привело к ухудшению формы частиц и увеличению сателлитов по сравнению с форсункой SuperSonic при аналогичных с режимом 3 параметрах распыления (см. рис. 2, з, табл. 2).

Сферическая форма частиц обеспечивает более плотную укладку при свободной насыпке порошков, поэтому из четырех режимов самый высокий показатель насыпной плотности у порошков по режиму 1 (см. табл. 2).

Пикнометрическая плотность частиц косвенно характеризует их внутреннюю пористость. Судя по значениям из табл. 2, самой высокой пористостью обладают частицы по режиму 4; пикнометрические плотности частиц по режимам 1–3 незначительно друг от друга отличаются (чуть выше плотность частиц по режиму 2).

Данные пикнометрических измерений подтверждаются металлографическими измерениями доли частиц с порами.

Гранулометрические составы порошков, полученных по разным режимам, даже в узкой фракции 20–63 мкм различаются (см. рис. 2, д–з), хотя средние размеры близки: режим 1 отличается более узким разбросом значений и малой долей крупных частиц, в порошках по режимам 2–4 крупных частиц больше. Параметр d_{50} для порошков по всем режимам составляет 36–40 мкм и удовлетворяет требованиям.

Результаты измерения текучести порошков фракции 20–63 мкм по режимам 1–3 удовлетворяют требованиям для использования их в аддитивных технологиях. На показатель текучести наибольшее влияние оказывают форма (сферические перемещаются лучше), плотность и размеры частиц (более тяжелые движутся быстрее) [18]. Анализ результатов показал, что хотя частицы по режиму 1 наиболее сферичны, но обладают не самым лучшим временем истечения. Меньшее время истечения порошков по режимам 2 и 3 обусловлено, очевидно, наличием большей доли крупных (см. рис. 2, е, ж) и немного более плотных частиц в этих порошках (см. табл. 2). Порошки по режиму 4 совсем не обладают текучестью, так как форма частиц далека от сферической,

много сателлитов и высокая пористость (низкий удельный вес частиц) (см. табл. 2).

Анализ результатов с использованием уравнения (2) позволил установить зависимость $D_{\text{частиц. ср}}/d_{\text{струи}}$ от расхода газа, учитывая, что в уравнении для определенного сплава при определенной температуре все члены уравнения, кроме расхода газа, являются константами (рис. 4).

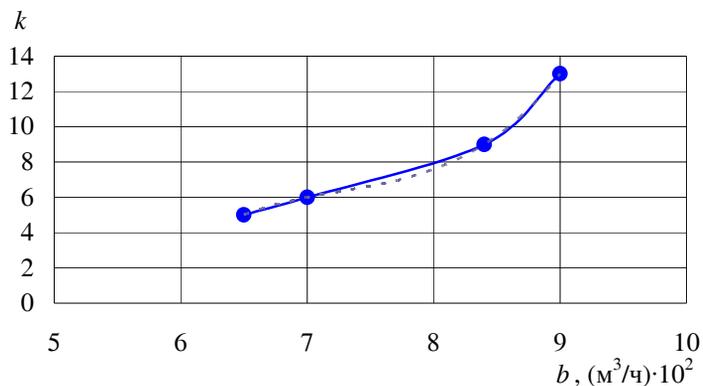


Рис. 3. Зависимость $D_{\text{частиц. ср}}/d_{\text{струи}}$ от расхода газа

Уравнение для рис. 3 принимает вид

$$k = 0,8747b^3 - 19,08b^2 + 139,97b - 338,88, \quad (3)$$

где $k - D_{\text{частиц. ср}}/d_{\text{струи}}$; $b - \text{расход газа, } (\text{м}^3/\text{ч}) \cdot 10^2$.

Уравнение для рис. 4 принимает вид

$$k = 2,7153b^2 - 45,663b + 232,3, \quad (4)$$

где $k - \text{целевая фракция, \%}$; $b - \text{расход газа, } (\text{м}^3/\text{ч}) \cdot 10^2$.

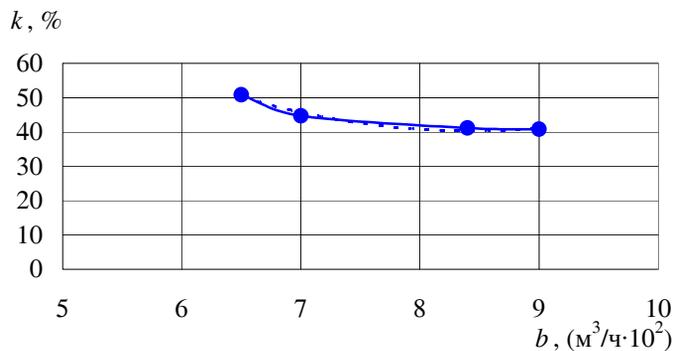


Рис. 4. Зависимость выхода целевой фракции от расхода газа

Еще один важный показатель, характеризующий гранулометрический состав порошков с экономической точки зрения, – выход целевой фракции, который на исследованных режимах был 40–50 %, причем чем меньше был выход целевой фракции, тем лучше были физические и технологические характеристики порошков (см. табл. 2). Этот параметр зависит от множества факторов и подбирается экспериментально для каждого сплава и аппаратуры для атомизации. Анализ результатов выявил обратно пропорциональную зависимость данной характеристики от расхода газа (рис. 4).

Заключение

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Выявлено, что использование форсунки SuperSonic при высоком значении объема подачи газа обеспечивает высокие показатели физических и технологических характеристик порошков 12X18H10T.
2. Установлена экспериментальная зависимость увеличения выхода целевой фракции (20–63 мкм) порошка при уменьшении объема подачи распыливающего газа.
3. Предложена физическая модель зависимости $D_{\text{частиц, ср}}/d_{\text{струи}}$ от расхода газа.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02.G25.31.0168 от 01.12.2015 г. в составе мероприятия по реализации Постановления Правительства РФ № 218).

Список литературы

1. Kim J., Creasy T.S. Selective laser sintering characteristics of nylon 6/clay-reinforced nanocomposite // Polymer Testing. – 2004. – Vol. 23, № 6. – P. 629–636.
2. The synthesis of a biocomposite based on nickel titanium and hydroxyapatite under selective laser sintering conditions / I.V. Shishkovsky, E.Y. Tarasova, L.V. Zhuravel', A.L. Petrov // Technical Physics Letters. – 2001. – Vol. 27, № 3. – P. 211–213.
3. Лазерные технологии быстрого прототипирования для изготовления индивидуальных имплантов и матриц для тканевой инженерии / В.К. Попов, Е.Н. Антонов, В.Н. Баграташвили [и др.] // Альманах клинической медицины. – 2006. – № 12. – С. 127–127.
4. Шишковский И.В. Перспективы быстрого прототипирования для изготовления моделей и литейных форм // Литейное производство. – 2010. – № 6. – С. 23–29.

5. Маслов Ю.В., Мищенко В.Ю. Быстрое прототипирование и его применение в аэрокосмической отрасли // Атмосферные энергетические установки. – 2011. – № 1. – С. 23–27.
6. Прототипирование и технология послойного синтеза в современном компьютеризированном производстве / О.С. Сироткин, Ю.М. Тарасов, С.Б. Рыцев, Р.И. Гирш // Российская энциклопедия CALS. Авиационно-космическое машиностроение / ОАО «НИЦ АСК». – М., 2008. – 608 с.
7. Шатульский А.А., Шаповалова М.А. Применение методов прототипирования для изготовления изделий машиностроения // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2011. – № 1. – С. 24–29.
8. Лыков П.А. Разработка гидропневмоагрегатов машин по производству микропорошков из жидких металлов: дис. ... канд. техн. наук. – Челябинск, 2013. – 147 с.
9. Зленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М. Аддитивные технологии в машиностроении. Пособие для инженеров / Центр. науч.-исслед. автомоб. и автомобил. ин-т «НАМИ». – М., 2015. – 220 с.
10. Neikov O.D., Naboychenko S.S., Dowson G. Handbook of non-ferrous metal powders. Technologies and applications. – Amsterdam: Elsevier, 2009. – P. 114–115.
11. Wiggers H., Koster S., Walzel P. Experiments to liquid metal atomization with a new prefilming nozzle // Proceedings of International Conference on Spray Deposition and Melt Forming. – Bremen Universitat, 2000. – P. 569–578.
12. Dunkley J.J. Atomization of metal powders in powder metallurgy. – Institute of Metals Publishers, 1991.
13. Dunkley J.J. Atomization // ASM Handbook, Vol. 7. Powder metal technologies and applications. – ASM International Publishers, 1998. – P. 35–52.
14. Tornberg C. Gas efficiency in different atomization system // Proceedings “Powder Production and Spray Forming”. Vol. 1. Metal Powder Industries Federation. – 1992. – P. 127–135.
15. Allen T. Particle size measurement. – 3rd ed. – Chapman and Hall Publishers, 1981.
16. Rai G., Lavernia E., Grant N.J. Powder size distribution in ultrasonic gas atomization // J. Met. – 1985. – № 37(8). – P. 22–29.
17. Lubanska H. Correlation of spray ring data for gas atomization of liquid metals // J. Met. – 1970. – № 22(2). – P. 45–49.
18. Либенсон Г.А., Лопатин В.Ю., Комарницкий Г.В. Процессы порошковой металлургии: в 2 т. Т. 1. Производство металлических порошков: учебник для вузов. – М.: Изд-во МИСиС, 2001. – 368 с.

References

1. Kim J., Creasy T.S. Selective laser sintering characteristics of nylon 6/clay-reinforced nanocomposite. *Polymer Testing*, 2004, vol. 23, no. 6, pp. 629–636.
2. Shishkovsky I.V., Tarasova E.Y., Zhuravel' L.V., Petrov A.L. The synthesis of a biocomposite based on nickel titanium and hydroxyapatite under selective laser sintering conditions. *Technical Physics Letters*, 2001, vol. 27, no. 3, pp. 211–213.

3. Popov V.K., Antonov E.N., Bagratashvili V.N. et al. Lazernye tekhnologii bystrogo prototipirovaniia dlia izgotovleniia individual'nykh implantov i matrits dlia tkanevoi inzhenerii [Laser technologies of fast prototyping for production of individual implants and matrixes for fabric engineering]. *Al'manakh klinicheskoi meditsiny*, 2006, no. 12, pp. 127–127.

4. Shishkovskii I.V. Perspektivy bystrogo prototipirovaniia dlia izgotovleniia modelei i liteinykh form [The prospects of fast prototyping for production of models and casting molds]. *Liteinoe proizvodstvo*, 2010, no. 6, pp. 23–29.

5. Maslov Iu.V., Mishchenko V.Iu. Bystroe prototipirovanie i ego primeneniye v aerokosmicheskoi otrasli [Fast prototyping and its application in space branch]. *Atmosfera energeti-cheskie ustanovki*, 2011, no. 1, pp. 23–27.

6. Cirotkin O.S., Tarasov Iu.M., Rytsev S.B., Girsh R.I. Prototipirovanie i tekhnologiiia posloinogo sinteza v sovremennom komp'iuterizirovannom proizvodstve [Prototyping and technology of layer-by-layer synthesis in the modern computerized production]. *Rossiiskaia entsiklopediia CALS. Aviatsionno-kosmicheskoe mashinostroenie. OAO «NITs ASK»*. Moscow, 2008, 608 p.

7. Shatul'skii A.A., Shapovalova M.A. Primeneniye metodov prototipirovaniia dlia izgotovleniia izdelii mashinostroeniia [Application of methods of prototyping for production of products of mechanical engineering]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 2011, no. 1, pp. 24–29.

8. Lykov P.A. Razrabotka gidropnevmoagregatov mashin po proizvodstvu mikro-poroshkov iz zhidkikh metallov [Development of hydropneumatic units of cars on production of micropowders from liquid metals]. Ph. D. thesis. Cheliabinsk, 2013, 147 p.

9. Zlenko M.A., Nagaitsev M.V., Dovbysh V.M. Additivnyye tekhnologii v mashinostroenii. Posobie dlia inzhenerov [Additive technologies in mechanical engineering]. Nauchno-issledovatel'skii avtomobil'nyi i avtomotorny institut «NAMI». Moscow, 2015, 220 p.

10. Neikov O.D., Naboychenko S.S., Dowson G. Handbook of non-ferrous metal powders. Technologies and applications. – Amsterdam: Elsevier, 2009. – R. 114–115.

11. Wiggers H., Koster S., Walzel P. Experiments to liquid metal atomization with a new prefilming nozzle. *Proceedings of International Conference on Spray Deposition and Melt Forming*. Bremen Universitat, 2000, pp. 569–578.

12. Dunkley J.J. Atomization of metal powders in powder metallurgy. Institute of Metals Publishers, 1991.

13. Dunkley J.J. Atomization. ASM Handbook, vol. 7. Powder metal technologies and applications. ASM International Publishers, 1998, pp. 35–52.

14. Tornberg C. Gas efficiency in different atomization system. Proceedings “Powder Production and Spray Forming”, vol. 1. *Metal Powder Industries Federation*, 1992, pp. 127–135.

15. Allen T. Particle size measurement. 3rd ed. Chapman and Hall Publishers, 1981.

16. Rai G., Lavernia E., Grant N.J. Powder size distribution in ultra-sonic gas atomization. *Journal Metal*, 1985, no. 37(8), pp. 22–29.

17. Lubanska H. Correlation of spray ring data for gas atomization of liquid metals. *Journal Metal*, 1970, no. 22(2), pp. 45–49.

18. Libenson G.A., Lopatin V.Iu., Komarnitskii G.V. Protsessy poroshkovoï metallurgii [Processes of powder metallurgy]. Tom 1. Proizvodstvo metallicheskikh poroshkov: uchebnik dlia vuzov. Moscow: Izdatel'stvo moskovskogo instituta stali i splavov, 2001, 368 p.

Получено 17.10.17

Об авторах

Оглезнева Светлана Аркадьевна (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: osa@pm.pstu.ac.ru.

Сметкин Андрей Алексеевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: solid@pm.pstu.ac.ru.

Митин Виталий Иванович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: ferro@bk.ru.

Калинин Кирилл Вячеславович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: kirk199@yandex.ru.

About the authors

Svetlana A. Oglezneva (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Materials, Technologies and Constructions of Machines, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: osa@pm.pstu.ac.ru.

Andrey A. Smetkin (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Materials, Technologies and Constructions of Machines, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: solid@pm.pstu.ac.ru.

Vitaliy I. Mitin (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Materials, Technologies and Constructions of Machines, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: ferro@bk.ru.

Kirill V. Kalinin (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Materials, Technologies and Constructions of Machines, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: kirk199@yandex.ru.