

УДК 621.762.2

DOI:10.26661/2071-3789-2019-1-41-08

Терновой Юрий Федорович, заведующий кафедрой, доктор технических наук
Личконенко Наталия Владимировна, старший преподаватель

ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ МИКРОСЛИТКОВ ДЛЯ 3D-ПРИНТЕРОВ

Запорожская государственная инженерная академия

Проанализировано влияние параметров газового распыления металлического расплава, а также физических свойств расплава и газа, на размер и форму получаемых частиц порошка. Установлено, что решающее влияние на распределение частиц по размерам, при прочих равных условиях, оказывает скорость газового потока.

Ключевые слова: аддитивные технологии, распыление, инертный газ, дисперсность частиц, скорость газового потока

Введение. Одним из современных перспективных направлений развития промышленности являются аддитивные технологии, обеспечивающие создание изделий высокого уровня сложности, свободного дизайна, с возможностью интегрирования любых элементов в конструкцию по заданным 3D-моделям. Применение данных технологий позволяет удешевить изделие, ускорить его проектирование и производство в машиностроении, оборонной и аэрокосмической промышленности, медицине и др. [1]. Однако промышленное применение современного оборудования для 3D-печати сдерживается необходимостью наличия для реализации таких технологий исходных материалов (порошков) с жестко заданными характеристиками, основными из которых являются:

– сферическая форма частиц порошка и минимальное количество дефектов, что обеспечивает «текучесть» порошковой композиции в системах подачи материалов с минимальным сопротивлением и позволяет формировать одинаковые по толщине и пористости слои порошка;

– диапазон размеров частиц, соответствие их узким фракциям, соотношение фракций внутри выбранного диапазона, которые определяют плотность, пористость и шероховатость получаемой поверхности, а также возможность унификации температурных режимов плавления частиц;

– химическая однородность, пониженное содержание газовых примесей и оксидов.

В настоящее время предприятия закупают и используют порошки зарубежного производства, которые характеризуются значительно завышенной стоимостью.

Основным методом производства специализированных порошков является распыление жидких металлов [2]. В мировой практике наиболее

широко применяются два промышленных способа производства порошков:

– центробежное распыление тонкой пленки расплава, образующейся под воздействием плазменной струи на торце быстровращающейся цилиндрической заготовки;

– газоструйное распыление расплава, заключающееся в гидродинамическом воздействии инертного газа (чаще всего аргона) на струю жидкого металла.

Метод центробежного распыления характеризуется неоднородностью химического состава получаемых порошков, связанной с ликвацией в самом распыляемом электроде, а также большим разбросом их дисперсности (50-600 мкм) с крайне низким выходом годного [3].

Порошки, полученные методом газоструйного распыления, имеют более низкую стоимость, правильную сферическую форму с сателлитами и хорошую насыпную плотность, но выход порошка необходимых фракций не превышает 15-20 % от общей массы распыленного металла.

Постановка задачи. Порошки для аддитивных технологий являются высокотехнологичным продуктом, производство которого требует обстоятельной научной и инженерной проработки. В связи с этим определяли параметры распыления, оказывающие влияние на характеристики частиц (форму и крупность), получаемых при распылении струи жидкого металла сжатым газом, что позволит создать метод получения именно сферических порошков без сателлитов с узким диапазоном крупности частиц.

Основная часть исследований. Важным показателем процесса распыления служит дисперсность порошка, которая исследована для жаропрочных и никелевых сплавов, припоев, магнитомягких материалов, инструментальных сталей и др. [4-5]. Основной вклад в исследование характеристик порошков, полученных газовым ра-

спылением металлического расплава инертными газами, внесли компании «ASEA» (Швеция), «Krupp» (Германия), «Wiggin Alloys Limited» (Великобритания), «Creosot Loire» (Франция) и ОАО «УкрНИИспецсталь» (Украина) [6-9].

Результаты экспериментальных исследований [10-12] реальных процессов диспергирования расплавов струей газа, в том числе с применением скоростной киносъемки и фоторегистрации, а также теоретические представления о распаде струи жидкости и пленки [13] дают возможность воссоздать физическую модель диспергирования в следующем виде.

При воздействии газа происходит деформирование струи жидкого металла. Под влиянием газодинамического вакуумирования приповерхностной зоны из нее формируется полый жидкометаллический конус-пленка [12,14]. Одновременно в струе развиваются колебательные процессы, обусловленные внешними (аэродинамические силы, вибрация и качество распылителя, конструктивные особенности распылительных узлов) и внутренними (силы инерции и поверхностного натяжения) факторами.

Распад конусной пленки, в которую трансформируется струя расплава, вызывает волны с быстро нарастающей во времени амплитудой. На периферии утончающейся пленки появляется утолщение как результат развития продольной волны с максимальной амплитудой. Наряду с продольной возникает поперечная волна [11], которая развиваясь по краю пленки, вдоль утолщения, формирует в нем перемычки в утолщении. Максимумы волны служат источниками микроструек или прядей жидкого металла. Фрагменты жидкого металла в виде струек (прядей) двигаются с относительно большой скоростью и под действием газодинамического напора окружающего газа распадаются на спектр мелких капель.

Предложенная физическая модель позволяет представить выражение для определения размера капель в следующем виде [15]:

$$d_e = \frac{2,91 v_{i \text{ до}}^{0,4} \cdot \rho_{i \text{ до}}^{0,2} \cdot D_C^{0,63}}{\gamma_{i \text{ до}}^{0,026} \cdot \rho_{\text{газ}}^{0,17} \cdot v_{\text{газ}}^{0,34}}, \quad (1)$$

где $v_{\text{мет}}$ – кинематическая вязкость металла; $\rho_{\text{мет}}$, $\rho_{\text{газ}}$ – плотность металла и газа соответственно; D_C – диаметр струи расплава; $\gamma_{\text{мет}}$ – удельная поверхностная энергия расплава; $v_{\text{газ}}$ – скорость газового потока.

Модель процесса преобразования струи расплава в капли при газовом распылении максимально учитывает феноменологию поэтапного преобразования расплава. Согласно получен-

ной математической зависимости можно сделать вывод, что размер распыленных капель определяется вязкостью, плотностью, удельной поверхностной энергией расплавленного металла, плотностью и скоростью газового потока, диаметром струи расплава. Проанализируем влияние отклонений от заданных параметров распыления на распределение частиц по размерам. Для этого используем уравнение (1), а в качестве объекта исследований выбираем жидкий никель со следующими параметрами и их вариациями: $v_{\text{мет}} = 0,25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ($\pm 10\%$); $\rho_{\text{мет}} \approx 8 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$ ($\pm 1\%$); $\gamma_{\text{мет}} \approx 1,6 \text{ Дж}/\text{м}^2$ ($\pm 5\%$); $\rho_{\text{газ}} \approx 1,78 \text{ кг}/\text{м}^3$ ($\pm 5\%$); $v_{\text{газ}} = 500 \text{ м}/\text{с}$; $D_C \approx 7 \text{ мм}$ ($\pm 13\%$).

Подставляя приведенные данные в выражение (1), нетрудно показать, что медианный размер капель соответствует значению $136 (\pm 25\%) \text{ мкм}$.

Изменение положения медианного размера на кривой распределения по размерам естественно смещает ветвь нижних размеров к более низким значениям, а ветвь больших размеров – к более высоким значениям, что сопровождается уширением распределения частиц по размерам. В этой связи представляет интерес изучение возможности стабилизации параметров, наиболее сильно влияющих на уширение дисперсности. При постоянстве всех других факторов скорость газового потока оказывает решающее влияние на распределение частиц по размерам.

На рис. 1 представлена эпюра распределения скоростей в газовом потоке на выходе из сопла форсунки.

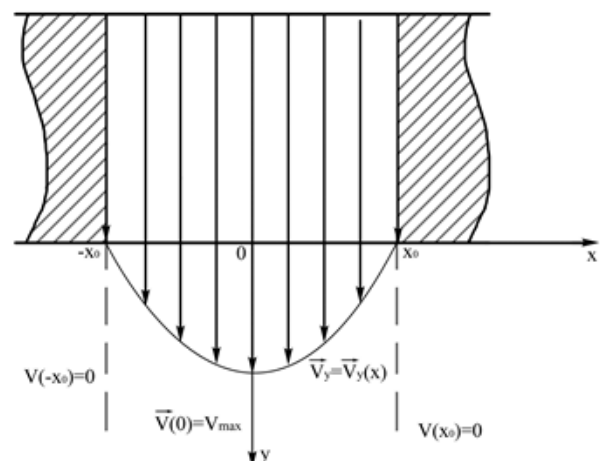


Рисунок 1 – Схема распределения скоростей газа-энергоносителя на выходе из сопла при использовании обычной форсунки

Из рис. 1 видно, что на оси потока наблюдается максимальная скорость газа $\vec{V}(0) = V_{\text{max}}$, а

в направлении стенок сопла форсунки ее величина снижается, при этом на поверхности сопла скорость равна нулю $V(\pm x_0) = 0$. Это происходит вследствие образования турбулентного газового потока и пограничного слоя, обусловленного трением между газом и поверхностью сопла.

Таким образом, для получения более однородного гранулометрического состава порошка следует добиться выравнивания распределения скоростей газа в потоке (от $V_{\text{газ}} = 0 - V_{\text{max}}$ до $V_{\text{газ}} = \text{const}$) (рис. 2).

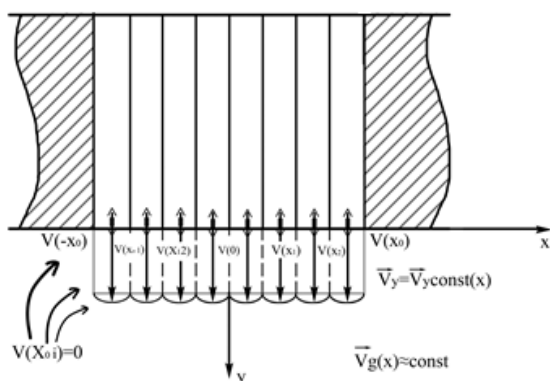
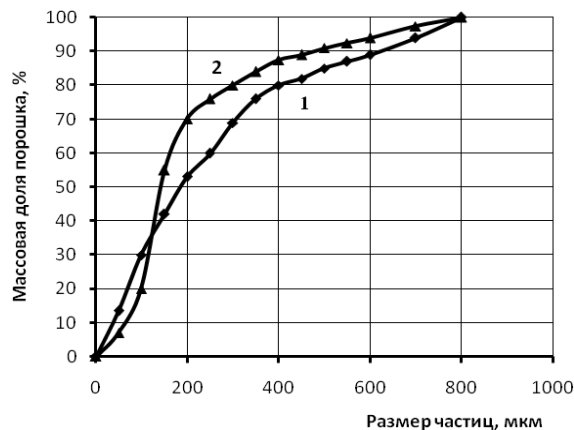


Рисунок 2 – Схема распределения скоростей газа-энергоносителя на выходе из сопла при установке устройства для выравнивания профиля скорости газового потока

Для подтверждения вышеизложенных теоретических предположений выполняли эксперимент по выравниванию скорости потока газа на выходе из сопла при распылении никелевого расплава аргоном. Кривые распределения микрогранул по размерам приведены на рис. 3.

Как свидетельствуют экспериментальные данные (рис. 3), применение устройства для выравнивания скорости в потоке газа, позволяет добиться более узкого распределения частиц по размерам. Так, при использовании стандартного потока газа массовая доля частиц в диапазоне размеров от 63 до 160 мкм составляет 25 % (кривая 1), а при выравнивании профиля скорости газового потока выход этой же фракции достигает 52 % (кривая 2).



1 – распыление с применением форсунки типа сопла Лавала; 2 – распыление с применением форсунки с равномерной скоростью по сечению газового потока
Рисунок 3 – Влияние типа форсунки на гранулометрический состав порошка никелевого сплава

Вращение газового потока вокруг струи расплава (создание искусственного «смерча») также приводит к распределению частиц разных размеров по радиусу факела распыления и одновременно способствует получению сферических частиц без сателлитов [16].

Выводы.

1. Изучение физических процессов, сопровождающих процесс распыления струи жидкого металла сжатым газом, позволяет определить зависимость размера частиц от параметров распыления и физических свойств расплава и газа.

2. При анализе математического выражения (1) выявлены резервы изменения дисперсности порошка и предложена их практическая реализация.

3. Получение частиц правильной сферической формы без сателлитов в заданном интервале гранулометрического состава возможно путем создания узла распыления ограниченной струи металлического расплава, который дает возможность реализовать поступательно-вращательную схему движения газа-энергоносителя одновременно с выравниванием профиля его скорости на выходе из сопла.

Бібліографічний перелік

1. Довбыш, В. М. Аддитивные технологии и изделия из металла [Электронный ресурс] / В. М. Довбыш, П. В. Забеднов, М. А. Зленко. – Режим доступа: http://nami.ru/uploads/docs/centr_technology_docs-/55a62fc89524bAT_metall.pdf.
2. Либенсон, Г. А. Процессы порошковой металлургии [Текст] / Г. А. Либенсон, В. Ю. Лопатин, Г. В. Комарницкий; учебник в 2 т. Т. 1: Производство металлических порошков – М.: Изд-во МИСиС, 2001. – 367 с.
3. Лыков, П. А. Получение металлических микропорошков газодинамическим распылением [Текст] / П. А. Лыков, Е. В. Сафонов, К. А. Бромер, А. О. Шульц // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – Сер. «Машиностроение». – 2012. – Вып. 33. – С. 107-112.
4. Белов, А. Ф. Металлургия гранул – новый прогрессивный технологический процесс производства мате-

- риалов [Текст] / А. Ф. Белов, Н. Ф. Аношкин, В. И. Ходин // Обработка легких и жаропрочных сплавов. – М. : Металлургия, 1976. – С. 217-226.
5. **Петров, А. К.** Влияние размера частиц на свойства распыленных порошков из быстрорежущей стали и заготовок из них [Текст] / А. К. Петров, Е. Н. Смирнова, И. Я. Кондратов и др. // Порошковая металлургия. – 1976. – № 5. – С. 18-23.
 6. **Dowson, G.** Powder Metallurgy in France [Text] / G. Dowson // Metal Powder Rept. – 1979. – Vol. 39, No. 9. – P. 410-432.
 7. **Bagter, H.** Powder Atomization of Nickel-base Superalloys [Text] / H. Bagter // Wire Ind. – 1979. – Vol. 96, No. 545. – P. 334-335.
 8. **Barrow, D. A.** Topics from powder metallurgy industry in the United Kingdom Barrow D.A. / D. A. Barrow // Fachberich fur Metallbearbeitung. – 1984. – Vol. 161, No. 11-12. – P. 504-506.
 9. **Technology Forecust '86 Powder Metallurgy** // Metal Progress. 1986. – Vol. 129, No. 1. – С. 33-36.
 10. **Ничипоренко, О. С.** Распыленные металлические порошки [Текст] / О. С. Ничипоренко, Ю. И. Найда, А. Б. Медведовский. – Киев : Наукова думка, 1980. – 240 с.
 11. **Шейхалиев, Ш. М.** Центробежно-гидравлический метод получения порошков. Сообщение 1. Исследование механизма распыления [Текст] / Ш. М. Шейхалиев, И. В. Шаронов, М. П. Карпов // Порошковая металлургия. – 1989. – № 6. – С. 16-21.
 12. **Bruce, S.** The Disintegration of Liquid Lead Streams by Nitrogen Jets [Text] / S. Bruce, J. G. Runkly, T. V. King // Metallurgical Transactions. – 1965. – Vol. 4, No. 11. – P. 2688-2673.
 13. **Левич, В. Г.** Физико-химическая гидродинамика [Текст] / В. Г. Левич. – М. : Физматгиз, 1959. – 699 с.
 14. **Бородин, В. А.** Распыливание жидкостей [Текст] / В. А. Бородин, Ю. Ф. Дитянин, Л. А. Клячко, В. И. Ягодкин. – М. : Машиностроение, 1967. – 263 с.
 15. **Терновой, Ю. Ф.** Инженерные расчеты технологических процессов распыления расплавленных металлов [Текст] / Ю. Ф. Терновой, С. С. Кудиевский, Н. Н. Пашетнева. – Запорожье : РИО ЗГИА, 2005. – 149 с.
 16. **Терновой, Ю. Ф.** Получение микрогранул сферической формы без сателлитов при диспергировании металлических расплавов инертным газом. Сообщение 1. Теоретические основы формообразования гранул в процессе газового распыления [Текст] / Ю. Ф. Терновой, С. А. Воденников, Н. В. Личконенко // Металургія : наукові праці Запорізької державної інженерної академії. – 2018. – Вип. 1 (39). – С. 48-51.

Терновий Юрій Федорович, доктор технічних наук, завідувач кафедри металургії, Запорізька державна інженерна академія (Україна, Запоріжжя). E-mail: ferrous.metals@ukr.net

Лічконенко Наталія Володимирівна, старший викладач кафедри металургії, Запорізька державна інженерна академія (Україна, Запоріжжя). E-mail: nvlichkon75@ukr.net

ОСОБЛИВОСТІ ОДЕРЖАННЯ МІКРОЗЛИТКІВ ДЛЯ 3D-ПРИНТЕРІВ

Виконано аналіз впливу параметрів газового розпилення, а також фізичних властивостей розплаву та газу на розмір і форму одержаних часточок порошку. Встановлено, що найбільш суттєво на розподіл часточок щодо розмірів за інших рівних умов впливає швидкість газового потоку.

Ключові слова: адитивні технології, розпилення, інертний газ, дисперсність часточок, швидкість газового потоку

Ternovyi Yuri, doctor of technical sciences, Head of Metallurgy Department, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Ukraine, Zaporizhzhia). E-mail: ferrous.metals@ukr.net

Lichkonenko Natalia, Senior Teacher of Metallurgy Department, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Ukraine, Zaporizhzhia). E-mail: nvlichkon75@ukr.net

FEATURES OF OBTAINING MICROLINKS FOR 3D-PRINTERS

The industrial application of modern additive technologies, which have some advantages, in Ukraine is constrained by the fact that for their implementation it is necessary to have initial powders with strictly specified characteristics - spherical shape of the powder particles, low number of defects, particle size correspondence to the required narrow fractions, chemical uniformity, low impurity content. The main methods for the production of specialized powders are various methods of spraying liquid metals. Therefore, the purpose of the work is to identify the spraying parameters that affect the characteristics of the particles (shape and size) obtained in the process of spraying a liquid metal jet by compressed gas, which will create a method for producing precisely spherical powders without satellites with a narrow particle size range. The results of experimental studies of real processes of dispersion of melts by a gas stream, as well as theoretical concepts of the decay of a liquid stream and a film, made it possible to recreate the physical model of dispersion, based on which an equation for determining the size of metal droplets is proposed, according to which their size is determined by the viscosity, density, and specific surface energy of the molten metal density and velocity of the gas stream, the diameter of the jet of melt. However, with the constancy of all other factors, the gas flow

rate has a decisive influence on the particle size distribution. Therefore, to obtain a more uniform particle size distribution of the powder, it is necessary to achieve equalization of the distribution of gas velocities in the stream. The experiments carried out using a device for equalizing the velocity in a gas stream at the exit of a nozzle during the atomization of a nickel melt with argon made it possible to achieve a narrower particle size distribution. So, when using a standard gas flow, the mass fraction of particles in the size range from 63 to 160 μm is 25%, and when the gas flow velocity profile is equalized, the yield of the same fraction is 52%. The rotation of the gas flow around the melt jet (creating an artificial tornado) also leads to the distribution of particles of different sizes along the radius of the spray plume and at the same time contributes to the production of spherical particles without satellites.

Key words: additive technology, atomization, inert gas, particle size, gas flow rate

Стаття надійшла до редакції 01.02.2019 р.
Рецензент, проф. В.О. Скачков