

УДК 621.762

## ОСОБЕННОСТИ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ СТРУИ РАСПЛАВА ГАЗОВЫМ ПОТОКОМ СО СЛОЖНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

М. Н. ВЕРЕЩАГИН<sup>+</sup>, Д. Л. СТАСЕНКО

Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, пр. Октября 48, 246746 г. Гомель, Беларусь.

*Представлены результаты исследований особенностей получения металлических порошков сплава на основе системы Fe-C-B-Si- при диспергировании струи расплава газовым потоком, имеющим вращательно-поступательно-колебательное движение. Выполнен анализ формы полученных изделий. Показано, что мощность газового потока оказывает наибольшее влияние на размеры получаемых изделий. Проведен теоретический анализ процесса диспергирования струи расплава газом-энергоносителем.*

### Введение

Новым методом получения порошковых материалов с улучшенными физико-механическими свойствами является метод быстрой закалки металла из жидкого состояния при диспергировании его газом-энергоносителем, имеющим поступательно-вращательно-колебательное (ПВК) движение.

Классификацию возможных методов воздействия газового потока на расплав в зависимости от используемых энергетических степеней свободы можно представить в виде схемы (рис. 1).

На практике наиболее часто реализуется распыление струи поступательно движущимся газовым потоком [2, 3]. Распыление газом с использованием поступательно-вращательного движения («распыление в смерче») используется меньше, чем предыдущий метод [4].

Схеме распыления расплава с одновременным использованием поступательного, вращательного и колебательного компонентов энергии газа с учетом ее потенциальной энергоемкости уделяется недостаточное внимание, хотя она является наиболее перспективной для получения мелкодисперсных порошков. Для реализации данной схемы распыления в газе-энергоносителе необходимо возбудить поступательное, вращательное и колебательное движения, что приведет к максимальному отбору мощности действия газового потока на струю расплава.

Целью данной работы явилось исследование особенностей получения металлических порошков в процессе диспергирования из жидкого состояния струи самофлюсующегося сплава на основе системы Fe-C-B-Si газовым потоком, имеющем

ПВК движение, анализ гранулометрического состава получаемых изделий, а также теоретические основы процесса ПВК диспергирования.

### Методика исследований

В качестве исходного материала для получения порошка и дискретного волокна использовался сплав системы Fe-C-B-Si следующего состава, мас. %: железо – основа; бор – 2,5±3; кремний – 2,0±2,5; углерод 0,4±0,6. Гранулы сплава загружались в кварцевый тигель, имеющий капиллярное отверстие. Плавление производилось токами высокой частоты. Истечение расплава через капиллярное отверстие тигля производили принудительно.

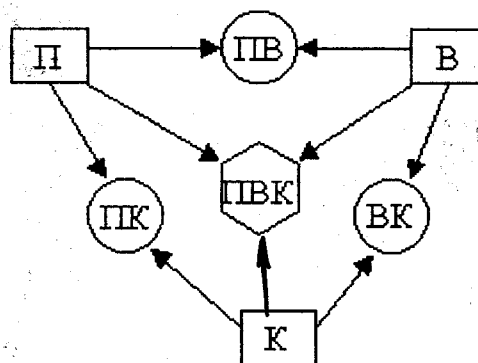


Рис. 1. Схемы газового распыления с использованием различных видов движения газового потока: К – колебательное движение; П – поступательное; В – вращательное; ПВ – поступательно-вращательное; ПК – поступательно колебательное; ВК – вращательно-колебательное; ПВК – поступательно-вращательно-колебательное

<sup>+</sup> Автор, с которым следует вести переписку.

тельно после полного расплавления сплава путем подачи инертного газа в полость тигля с расплавом. Давление в тигле создавали только после полного расплавления сплава, что обеспечивало контролируемый слив расплава. Слив струи расплава осуществляли в центральное отверстие распылительного устройства. К каналам распылительного устройства подводился газ-энергоноситель, причем для придания газу-энергоносителю вращательного движения каналы для его подвода располагались тангенциально, а для придания последнему колебательного движения в каналах для подвода газа энергоносителя устанавливались стержневые газоструйные генераторы акустической частоты. В качестве газа-энергоносителя был выбран сжатый воздух с давлением 0,4–1,5 МПа. Распыленный в распылительном устройстве расплав охлаждался в камере с регулируемой температурой. Контроль и регулирование температуры в камере осуществляли при помощи термодатчика, связанного с цифровым табло, и электронным датчиком температуры.

Размер получаемых изделий определяли путем рассева в наборе микропрецизионных проволочных сит на специальном встряхивающем устройстве в течение 30 мин с последующим определением массы каждой фракции при помощи аналитических весов. Форма полученных частиц изучалась с использованием оптического микроскопа Neophot-2.

## Результаты исследований

Исследования показали, что конечные размеры получаемых частиц зависят от ряда технологических факторов, причем наибольшее влияние на геометрические размеры получаемых частиц оказывает положение генераторов акустической частоты и исходное давление газа-энергоносителя.

Выполненный оптический анализ формы полученных изделий свидетельствует, что ПВК диспергирование расплава в камеру с контролируемой температурой обеспечивает получение частиц шаровидной формы (рис. 2).

Получение частиц ПВК диспергированием расплава в условиях ограниченного слива и при кристаллизации последнего в камере с контролируемой температурой является одной из сложных задач в математической физике, т. к. требует учета влияния трех видов движения газового потока: поступательного, вращательного, акустического. Это обстоятельство обуславливает необходимость разработки теоретических основ процессов, происходящих при ПВК диспергировании расплава, и их влияния на конечные размеры получаемых частиц.

Схема распыления расплава при создании в газе-энергоносителя поступательного, вращательного и колебательного компонентов энергии газа с учетом ее потенциальной энергоемкости наибо-

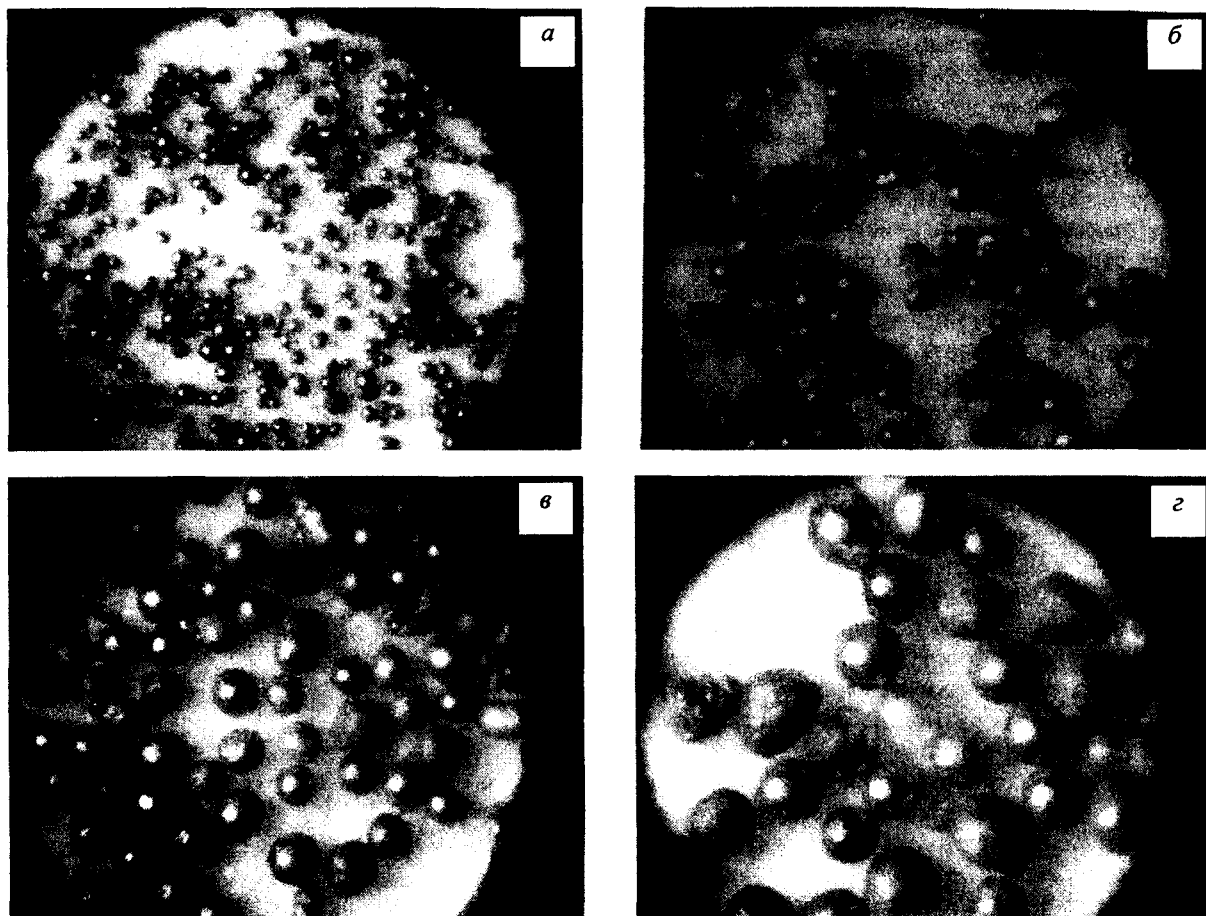


Рис. 2. Внешний вид порошковых частиц различных фракций ( $\times 100$ ): а – 50 мкм; б – 50+63; в – 63+100; г – 100+160 мкм

лее перспективна для получения мелкодисперсных порошков.

Мощность поступательно-движущегося газового потока с учетом составляющих движения вдоль струи расплава и перпендикулярно последней можно определить из следующего выражения:

$$W_{xy} = 50 \frac{dm_{\Gamma}}{dt} v_y^2 (1 - \operatorname{tg}^2 \alpha), \quad (1)$$

где  $v_y$  – компонента скорости потока по оси  $y$ ;  $dm_{\Gamma}/dt$  – массовый расход газа энергоносителя;  $\alpha = \operatorname{arccctg}(v_x/v_y)$  – угол атаки газа-энергоносителя на струю расплава;  $v_x = v \operatorname{tg} \alpha$  – компонента скорости потока вдоль оси  $x$ . Вращательное движение газового потока вокруг струи расплава приводит к добавочной мощности газового потока, которую можно определить из следующего выражения [5]:

$$W_{\tau} \approx 50 \left( \frac{dm_{\Gamma}}{dt} \right) \omega^2 r^2, \quad (2)$$

где  $\omega = v/2\pi r$  – частота вращения газового потока;  $r$  – рассматриваемый радиус вращения газового потока.

Учет выражений (1) и (2) позволяет получить выражение для вычисления мощности газового потока в зависимости от времени в  $i$ -й точке пространства:

$$W_i(t) = 50 Q \rho_{\Gamma}(t) \left[ v_{yi}^2 (1 - \operatorname{tg}^2 \alpha) + \omega_i^2 r_i^2 \right], \quad (3)$$

где  $Q$  – объемный расход газа;  $\rho_{\Gamma}(t)$  – плотность газа в потоке в  $i$ -й точке пространства в зависимости от времени  $t$ .

При наложении акустических колебаний на полученный газовый поток происходит модуляция последнего по плотности. Пульсации плотности газа, воздействующего на струю расплава, приводят к пульсациям мощности газового потока. Акустическую мощность, передаваемую газовому потоку генераторами акустической частоты, можно определить в случае, если известны условия возбуждения акустических колебаний. Наиболее простым и надежным устройством, обеспечивающим придание газовому потоку акустических колебаний, является акустический газоструйный стержневой генератор Гартмона, достоинствами которого являются конструктивная простота, легкость извлечения из распыляющего устройства, возможность перестройки частоты генерации, обеспечение модуляции по плотности газового потока по всему сечению подводящих каналов.

Элементы акустических генераторов Гартмона, установленных в каналах для подвода газа энергоносителя, можно рассчитать с учетом условий настройки, обеспечивающих получение максимальной акустической мощности [6]:  $h = l$ , где  $l$  – глубина резонатора;  $h$  – расстояние от сопла до входа в резонатор. Опытным путем установлено,

что длину первой ячейки можно определить из уравнений:

$$\Delta = 1,1(d_c - d_{\text{ст}}) \left( 1 + 0,8 d_{\text{ст}}/d_c \right) \left[ (P_{\text{н}} - 0,9)/P_a \right]^{0,5}, \\ d_p/d_c = 1,6\Delta,$$

где  $d_c$  – диаметр сопла;  $d_{\text{ст}}$  – диаметр стержня;  $d_p$  – диаметр полости резонатора;  $P_{\text{н}} = P_0 - P_a$  – перепад давления газа-энергоносителя;  $P_a$  – давление газа в окружающей среде. При расчетах необходимо учитывать условия следующего неравенства:  $(N\pi d_k^2/h) \geq S_{\text{вых}}$ , где  $N$  – количество каналов для подвода газа-энергоносителя;  $d_k$  – диаметр единичного канала для подвода газа-энергоносителя;  $S_{\text{вых}}$  – площадь выходного сечения сопла распыляющего устройства. Для определения частоты генерации (кГц), излучаемой единичным акустическим генератором Гартмона можно воспользоваться следующей эмпирической зависимостью [7]:

$$f = \frac{c}{4} \left[ h + 0,4l + (d_p - d_{\text{ст}}) (0,4 - 0,2h/d_c) \right] \times \\ \times 0,78 \sqrt[3]{P_{\text{н}} - 0,93},$$

где  $c$  – скорость звука в газе-энергоносителе. А для определения акустической мощности (кВт), развиваемой единичным акустическим генератором, можно воспользоваться следующей эмпирической зависимостью:

$$W_{\text{ал}} = 295 \left[ \left( \frac{d_c - d_{\text{ст}}}{100} \right) \left( 1 + 0,8 \frac{d_{\text{ст}}}{d_c} \right) \right]^2 \sqrt{P_{\text{н}} - 0,9/P_a}, \quad (4)$$

где  $P_{\text{н}}$ ,  $P_a$  – перепад давления и давление в окружающей среде на выходе из распылительного устройства соответственно;  $d_c$ ,  $d_{\text{ст}}$  – диаметр сопла и стержня резонатора соответственно.

С учетом вышесказанного выражение (3) перепишется в виде:

$$W_i(t) = 50 Q \rho_{\Gamma}(t) \left[ v_{yi}^2 (1 - \operatorname{tg}^2 \alpha) + \omega_i^2 r_i^2 \right] + N W_{\text{ал}} \quad (5)$$

или с учетом зависимости (4):

$$W_i(t) = 50 Q \rho_{\Gamma}(t) \left[ v_{yi}^2 (1 - \operatorname{tg}^2 \alpha) + \omega_i^2 r_i^2 \right] + \\ + N 295 \left[ \left( (d_c - d_{\text{ст}})/100 \right) \left( 1 + 0,8 d_{\text{ст}}/d_c \right) \right]^2 \times \\ \times \sqrt{(P_{\text{н}} - 0,9)/P_a} \quad (6)$$

Зависимости мощности газового потока, развиваемой распыляющим устройством, от первоначального давления газа-энергоносителя для различных газов представлены на рис. 3. Можно видеть, что независимо от газа-энергоносителя мощность увеличивается пропорционально увеличению давления подаваемого газа энергоносителя. Из полученных зависимостей видно, что мощность, развиваемая установкой, также зависит и от свойств газа-энергоносителя. Так, при одних и тех же условиях при использовании в качестве газа-энергоносителя

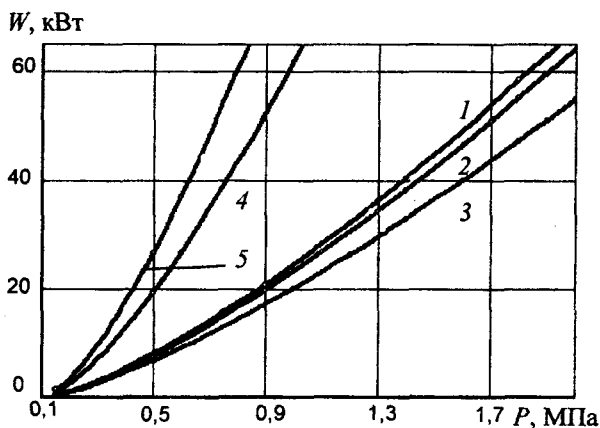


Рис. 3. Изменение мощности газового потока в зависимости от давления подаваемого газа: 1 – азот; 2 – воздух; 3 – аргон; 4 – гелий; 5 – водород

азота, аргона или воздуха, максимальную мощность можно получить при распылении азотом, а минимальную – аргонном. Максимальная мощность, развиваемая устройством для распыления, при использовании в качестве газа-энергоносителя азота, составляет 68 кВт.

Скорость движения газового потока в зоне распыления заметно превышает скорости струи и распыленных капель, что позволяет многократно воздействовать модулированными по плотности сгустками на расплав и тем самым повышать эффективность его диспергирования. Поэтому число Вебера можно принять примерно равным плотности газа в сгустке [5]:

$$We = \frac{\rho_{\Gamma} v_{\Gamma}^2 d_{cp}}{\sigma} \cong \rho_{max} \approx 15, \quad (7)$$

где  $d_{cp}$  – средний диаметр частиц, получаемых диспергированием струи расплава;  $v_{\Gamma}$  – линейная скорость газового потока;  $\sigma$  – поверхностное натяжение расплава.

Подстановка соотношения (7) в выражение (6) дает возможность для определения среднего диаметра частиц, полученных диспергированием струи расплава газовым потоком, совершающим поступательно-вращательно-колебательное движение:

$$d_{cp} = \frac{50 Q \sigma [v_{yi}^2 (1 - \operatorname{tg}^2 \alpha) + \omega_i^2 r_i^2] We}{v_{\Gamma}^2 [W_i(t) + N W_a]} \quad (8)$$

С помощью данного выражения можно определить средний диаметр получаемых частиц в зависимости от свойств газа-энергоносителя и параметров распыляющего устройства.

Расчеты показывают, что средний диаметр получаемых частиц, при диспергировании расплава, уменьшается с увеличением мощности газового потока, причем значительное изменение среднего диаметра частиц происходит при мощности до 20 кВт. Дальнейшее увеличение мощности га-

зового потока практически не влияет на средний диаметр частиц, получаемых ПВК диспергированием расплава.

### Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать ряд выводов. При диспергировании расплава газовым потоком, совершающим поступательно-вращательно-колебательное движение, давление газа-энергоносителя имеет решающее влияние на дисперсность получаемых частиц. Положение резонаторов, обеспечивающих максимальную акустическую мощность газового потока, а, следовательно, ведущую к получению изделий минимальных размеров, составляет примерно 16 мм от торца входного отверстия. Способом ПВК диспергирования возможно получение частиц с размерами меньшими по сравнению с другими методами газового распыления расплава. Частицы, полученные данным способом, имеют ровную и гладкую поверхность, что позволяет рекомендовать этот метод для получения частиц малых размеров с формой, близкой к сферической, с наименьшими энергетическими затратами.

### Обозначения

$v_y$  – компонента скорости потока по оси  $y$ ;  
 $dm_{\Gamma}/dt$  – массовый расход газа энергоносителя;  $\alpha$  – угол атаки газа-энергоносителя на струю расплава;  
 $v_x$  – компоненты скорости газового потока вдоль оси  $x$ ;  $v_{\Gamma}$  – скорость газового потока;  $\omega$  – частота вращения газового потока;  $r$  – рассматриваемый радиус вращения газового потока;  $Q$  – объемный расход газа;  $\rho_{\Gamma}(t)$  – плотность газа в потоке в  $i$ -й точке пространства в зависимости от времени  $t$ ;  $h$  – глубина резонатора;  $l$  – расстояние от сопла до входа в резонатор;  $d_c$  – диаметр сопла;  $d_{ст}$  – диаметр стержня;  $d_p$  – диаметр полости резонатора;  $P_{и}$  – перепад давления газа-энергоносителя;  $P_a$  – давление газа в окружающей среде;  $N$  – количество каналов для подвода газа-энергоносителя;  $d_k$  – диаметр единичного канала для подвода газа-энергоносителя;  $S_{вых}$  – площадь выходного сечения сопла распыляющего устройства;  $c$  – скорость звука в газе-энергоносителе;  $d_{cp}$  – средний диаметр частиц, получаемых диспергированием струи расплава;  $\sigma$  – поверхностное натяжение расплава.

### Литература

1. Дорожкин Н. Н., Горнский Т. Т. Получение порошковых изделий и покрытий из материалов на железной основе. Мн.: БелНИИТИ (1990)
2. Сопловой узел для распыления расплавленного металла газом: а. с. 183266 ЧССР, МКИ В 22 F 9/08. Изобретения за рубежом (1964), № 1, 17
3. Устройство для получения металлического порошка путем распыления расплава газовой струей: заявка 2742733 ФРГ, МКИ В 22 F 9/08. Изобретения за рубежом (1981), № 2, 27
4. Способ получения металлических порошков: патент 2071102 Франция. Изобретения за рубежом (1965), № 6, 31

5. Терновой Ю. Ф., Пашетнева Н. Н. Классификация и особенности комбинированных схем газоструйного распыления // Порошковая металлургия (1989), № 4, 5–10
6. Агронат Б. А., Дубровин М. Н., Хавский Н. Н. и др. Основы физики и техники ультразвука. М.: Высшая школа (1987)
7. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Под ред. И. П. Голямина. М.: Советская энциклопедия (1979)
8. Бородин В. А., Дитякин Ю. Ф., Клячко Л. А., Ягодкин В. И. Распыливание жидкостей. М.: Машиностроение (1967)

---

Vereschagin M. N., Stasenko D. L.

**Peculiarities of disintegration of a melt spray by gas flow with complex motion.**

The results of the research of obtaining metal powders from alloy on the basis of Fe-C-B-Si- system at dispersion of the melt spray by gas flow having a complex rotational-translational-vibratory motion are presented. The shape of obtained items has been analyzed. It is shown that power of the gas flow renders the greatest influence on the sizes of received items. The process of dispersion of a melt spray by gas flow was theoretically analyzed.

*Поступила в редакцию 02.03.01.*

© М. Н. Верещагин, Д. Л. Стасенко, 2001.