

УДК 621.762.2

Терновой Юрий Федорович, заведующий кафедрой, доктор технических наук
Воденников Сергей Анатольевич, первый проректор, доктор технических наук
Личконенко Наталия Владимировна, старший преподаватель

ПОЛУЧЕНИЕ МИКРОГРАНУЛ СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ БЕЗ САТЕЛЛИТОВ ПРИ ДИСПЕРГИРОВАНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ ИНЕРТНЫМ ГАЗОМ

Сообщение 1. Теоретические основы формообразования гранул в процессе газового распыления

Запорожская государственная инженерная академия

Рассмотрены теоретические закономерности формообразования микрогранул при распылении металлических расплавов инертным газом. Определены основные факторы, влияющие на форму единичных частиц порошка.

Ключевые слова: распыление, инертный газ, микрогранула, частица-сателлит, факторы формообразования

Введение. Комплекс методов получения микрогранул распылением струи жидкого металла является одним из наиболее сложных технических и наукоемких направлений порошковой металлургии, открывающим широкие возможности получения новых материалов с уникальным сочетанием свойств. Высоколегированные гранулы используются для создания деталей ответственного назначения различных отраслей промышленности: изделий и полуфабрикатов для авиационной и космической техники на основе сплавов никеля, алюминия и титана; дисков газотурбинных двигателей, конструкций энергетических установок; режущих и штамповых инструментов из высоколегированных сталей; порошковых деталей для автомобилестроения, химической промышленности, медицины и т.д. [1].

Различные виды распыления расплавленного металла с использованием газового потока (энергонасителя) широко применяют для многотоннажного получения металлических порошков. Детали, полученные из таких порошков, отличаются повышенной прочностью и пластичностью, что обусловлено высокой скоростью остывания частиц в процессе распыления жидкого металла. Этот метод отличается высокой производительностью, позволяет применять различные энергонасители (воздух, аргон, азот, гелий, диоксид углерода и др.) и позволяет получать порошок практически любого состава при высокой степени однородности.

Методы распыления потоком газа применяются для получения порошков сплавов на основе железа, титана и меди. Инертный газ используется при распылении никелевых и титановых жаропрочных сплавов, а также других сильно окисляющихся металлов.

Качество распыленных металлических гранул, как исходного продукта для получения за-

готовок, изделий, либо конечного продукта, в основном, определяется параметрами технологии диспергирования.

Распыление струи расплава, в результате воздействия на нее газового потока, происходит под действием аэродинамических сил, определяемых скоростью газового потока. Механизм распыления струи расплава за счет кинетической энергии газа (энергонасителя) заключается в последовательном диспергировании расплава на мелкие капли. Из практики распыления расплавов инертными газами известно, что основным формообразующим фактором являются взаимные столкновения частиц при полете [2], а также столкновение капель с экраном или стенками камеры распыления. В первом случае образуются сравнительно крупные частицы, к поверхности которых привариваются при полете мелкие частицы-сателлиты, а во втором – чешуйчатые или пластинчатые частицы.

Постановка задачи. Для практической реализации процесса получения частиц сферической формы без частиц-сателлитов необходимо изучение закономерностей процессов формообразования частиц порошка при распылении газом.

Основная часть исследований. В общем случае форма единичных капель, получающихся в результате распада прядей расплава (микроструй), зависит от соотношения следующих величин:

- времени охлаждения $\tau_{\text{охл}}$;
- времени сфероидизации или времени затухания колебаний вокруг равновесной шаровидной формы $\tau_{\text{зат}}$;
- периода колебаний монотонного или колебательного движения поверхности капли к сферической форме $\tau_{\text{кол}}$;

- времени движения капля до экрана $\tau_{\text{прол}}$;
- времени кристаллизации, когда жидкая фаза присутствует в частице наряду с твердой и удар об экран может изменить ее форму $\tau_{\text{кр}}$;
- времени свободного пробега между отдельными взаимными столкновениями капля в полете $\tau_{\text{сн}}$.

Рассмотрим зависимость этих временных величин от параметров расплава и процесса распыления.

Согласно работе [2], время охлаждения можно определить по формуле:

$$\tau_{\text{охл}} = \frac{c_{Me} \cdot \rho_{Me} \cdot d_k}{6\alpha} \cdot \ln \left[\frac{t_{Me} - t_g}{t_{кр} - t_g} \right], \quad (1)$$

где c_{Me} , ρ_{Me} – соответственно теплоемкость и плотность расплавленного металла; d_k – диаметр капли; t_{Me} , t_g – температура расплава и газа соответственно; $t_{кр}$ – температура кристаллизации; α – коэффициент теплоотдачи за счет вынужденной конвекции, $\alpha = Nu \cdot \lambda_g / d_k$, λ_g – теплопроводность газа, Nu – число Нуссельта.

Число Нуссельта можно рассчитать по формуле [3]:

$$Nu = 2 \left[1 + 0,276 Re^{0,6} \cdot Pr^{0,5} \right], \quad (2)$$

где Re , Pr – числа Рейнольдса и Прандтля соответственно: $Re = V_g \cdot d_k / \nu_g$; $Pr = \nu_g \cdot \rho_g \cdot c_g / \lambda_g$; ν_g , ρ_g , c_g – кинематическая вязкость, плотность и теплоемкость газа соответственно.

Время сфероидизации (или время затухания колебаний в случае колебательного характера приближения формы к шаровидной) $\tau_{\text{зат}}$ рассчитываем согласно соотношению [4]:

$$\tau_{\text{зат}} = \frac{3\pi}{4V_k} \cdot \frac{\mu_{Me}}{\gamma_{Me}} \cdot \left[R_{np}^4 - (0,5 d_k)^4 \right], \quad (2)$$

где R_{np} – радиус пряди (микроструйки), распадается на капли; V_k – объем капли; γ_{Me} – удельная поверхностная энергия расплава.

Согласно нашей модели распада струи на капли [5], величина R_{np} связана с d_k , с учетом длины волны неустойчивости λ_{mc} , имеющей максимальную скорость роста амплитуды, развивающейся в микроструйке, как

$$R_{np} = 0,82 d_k^{12/11} \cdot \gamma_{Me}^{1/11} \cdot \nu_{Me}^{-2/11} \cdot \rho_{Me}^{-1/11}, \quad (3)$$

где ν_{Me} – кинематическая вязкость расплава.

Период колебаний капли $\tau_{\text{кол}}$, согласно работе [6], определяется формулой:

$$\tau_{\text{кол}} = (\omega_0^2 - \psi^2)^{-0,5}, \quad (4)$$

где ω_0 , ψ – частота собственных колебаний капли и декремент затухания колебаний соответственно; $\omega_0 = (32\pi \cdot \gamma_{Me} / 3M_k)^{0,5}$; $\psi = 1/\tau_{\text{зат}}$; M_k – масса капли.

Величина $\tau_{\text{прол}}$ определяется с учетом вектора скорости капли v_k , тормозящих и ускоряющих свойств среды распыления на участке полета, а также расстояния до экрана L :

$$\tau_{\text{прол}} = \tau_{\text{прол}}(v_k, V_g, \rho_g, \nu_g, d_k, L). \quad (5)$$

Время свободного пробега $\tau_{\text{сн}}$ крупной капли с диаметром d_1 до столкновения с мелкой каплей диаметром d_2 , согласно работе [2], определяется по формуле:

$$\tau_{\text{сн}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{d_1^2 \cdot V_{2k}}{E_{21} \cdot (d_1 + d_2)^2 \cdot (V_{2k} - V_{1k}) \cdot W_g \cdot \beta'_2}, \quad (6)$$

где W_g – скорость газового потока; V_{1k} , V_{2k} – скорость крупной и мелкой капли соответственно; d_1 , d_2 – диаметр крупной и мелкой капли соответственно; β'_2 – объемная концентрация мелких капель в факеле распыления; E_{21} – коэффициент осаждения мелких частиц на большую ($E_{21} \cong 0,7 \dots 0,9$).

Время кристаллизации частиц $\tau_{\text{кр}}$ может быть оценено по формуле [7]:

$$\tau_{\text{кр}} = \tau_{\text{охл}} + \frac{q \cdot \rho_{Me} \cdot d_k}{6\alpha \cdot (t_{кр} - t_g)}, \quad (7)$$

где q – удельная теплота кристаллизации.

Управлять параметрами $\tau_{\text{зат}}$, $\tau_{\text{кол}}$, $\tau_{\text{кр}}$ практически невозможно при фиксированных скоростях газового потока, физических свойствах газа и расплава. Активное воздействие на величину $\tau_{\text{охл}}$ также проблематично, поскольку, кроме скорости газового потока и t_{Me} , больше нет факторов воздействия, а они оказывают влияние в пределах порядка величины на широкий круг высокотемпературных сплавов и сталей. Величина $\tau_{\text{прол}}$ определяется конструктивно, и при получении гранул ее выбирают такой, чтобы в полете обеспечивалось полное затвердевание каплей.

Оценочные расчеты постоянных времени, за исключением $\tau_{\text{сн}}$, выполненные с учетом свойств сплавов на основе никеля, кобальта и железа, распыленных аргоном при перегреве, приведены в табл. 1.

Таблиця 1 – Постоянные времена, характеризующие формирование частиц высокотемпературных расплавов при газовом распылении

Параметр времени, с	Размер капель, мкм			
	10	50	100	200
$\tau_{\text{охл}}, 10^*$	$(4,5 \dots 4,7) \cdot 10^{-6}$	$(6,2 \dots 6,4) \cdot 10^{-5}$	$(1,3 \dots 1,5) \cdot 10^{-4}$	$(2,2 \dots 2,4) \cdot 10^{-3}$
$\tau_{\text{охл}}, 200^*$	$(8,2 \dots 8,4) \cdot 10^{-5}$	$(1,1 \dots 1,2) \cdot 10^{-3}$	$(2,5 \dots 2,7) \cdot 10^{-3}$	$(4,1 \dots 4,3) \cdot 10^{-2}$
$\tau_{\text{зат}}$	$(5,0 \dots 6,0) \cdot 10^{-6}$	$(4,5 \dots 5,5) \cdot 10^{-5}$	$(1,0 \dots 1,5) \cdot 10^{-4}$	$(1,0 \dots 2,0) \cdot 10^{-3}$
$\tau_{\text{кол}}$	$(7,8 \dots 8,2) \cdot 10^{-14}$	$(9,0 \dots 11,0) \cdot 10^{-12}$	$(7,9 \dots 8,1) \cdot 10^{-11}$	$(0,9 \dots 1,1) \cdot 10^{-8}$
$\tau_{\text{охл}} / \tau_{\text{зат}}, (200^*)$	15,1 (с)	23,0 (с)	25,0 (с)	28,0 (с)
$\tau_{\text{охл}} / \tau_{\text{зат}}, (10^*)$	0,84 (с)	1,26 (с)	1,32 (с)	1,53 (с)

*Примечание: индексы 200 и 10 при $\tau_{\text{охл}}$ означают степень перегрева выше температуры кристаллизации, °С; индекс (с) указывает на сферичность частицы; (\approx) - на форму, близкую к сферической

Результаты расчетов показывают, что в любом случае для капель размером до 500 мкм выполняются условия $\tau_{\text{охл}} > \tau_{\text{зат}}$. При этом малая величина $\tau_{\text{кол}}$ свидетельствует о независимости формы частиц от колебательного процесса и прохождении полного процесса сфероидизации капель: колебания затухают до начала процесса кристаллизации. Как видно из таблицы, при снижении перегрева до 10 °С форма частиц всех фракций практически близка к сферической $\tau_{\text{охл}} \approx \tau_{\text{зат}}$.

В связи с этим необходимо отметить, что в стандартных процессах газового распыления единственная возможность управлять формой частиц заложена в регулировании $\tau_{\text{сп}}$ с помощью величин E_{21} и β'_2 , определяющих, в конечном счете, степень присутствия частиц-сателлитов на поверхности крупной частицы. Величина β'_2 зависит от объемной плотности мелкодисперсных частиц в металл-газовом факеле. Снижение выхода мелких фракций, получение мелкодисперсного порошка, разрежение факела путем перехода от ограниченного слива к распылению свободнопадающей струи приводит к снижению β'_2 и, как показывают практические данные, снижению количества частиц-сателлитов на поверхности более крупных гранул. Величины E_{21} и β'_2 могут быть далее понижены при возможности организации в газовом потоке факела распыления, например, уноса в радиальном направлении, мелких капель за пределы факела распыления. Действительно, при стандартных схемах газового распыления реализуется поступательный поток газа в металл-газовом факеле, в котором, несмотря на его коническое уширение, по мере удаления от сливного патрубка инерционные мелкие капли,

ускоряясь интенсивнее, чем крупные, достигают в газовом потоке последние и привариваются к их поверхности. При создании вращения газового потока вокруг оси распыления в радиальном направлении действуют центробежные силы и более податливые мелкие частицы могут быть вынесены за пределы факела распыления. Этот процесс описывается уравнениями (9-11) [8]:

$$\frac{dV_x}{dt} = \frac{V_\tau^2}{x} \cdot \left[1 - \frac{\rho_g \cdot (\omega_g \cdot X)^2}{\rho_{Me} \cdot V_\tau^2} \right] - \frac{\rho_g \cdot k \cdot A \cdot V_f \cdot V_x}{2M} : (10)$$

$$\frac{dV_\tau}{dt} = \frac{V_\tau \cdot V_x}{X} \cdot \left[\frac{\rho_g \cdot k \cdot A \cdot V_f \cdot (\omega_g \cdot X - V_\tau)}{2M} \right] (11)$$

где V_x , V_τ – компонента скорости частицы в вертикальном и радиальном ее направлении соответственно, V_f – параметр, характеризующий скорость радиального уноса частиц; $V_f = [V_x^2 + (\omega_g \cdot X - V_\tau)^2]^{0,5}$; ω_g – угловая частота вращения газового потока.

Облегчает процесс выноса мелких капель за пределы первоначального факела и то, что мелкие частицы образуются, в основном, в периферийной зоне исходной струи расплава, энергетическое воздействие газа-энергоносителя на которую максимально. Такая схема в принципе может позволить добиться значения $\beta'_2 \Rightarrow 0$, а $\tau_{\text{сп}} \Rightarrow \infty$. Поскольку тогда $\tau_{\text{сп}} > \tau_{\text{охл}}$, являющейся конечной величиной, может быть получен порошок идеальной сферической формы без частиц-сателлитов.

Выводы.

1. Рассмотрены факторы, влияющие на форму единичных частиц порошка при распылении металлических расплавов газом.

2. Установлено, что организация вращения газового потока вокруг оси распыления в радиа-

льном направлении облегчает процесс выноса мелких частиц за пределы факела распыления, что, в свою очередь, приводит к снижению количества частиц-сателлитов на сферических порошковых частицах.

3. Изложенные выше теоретические закономерности являются предпосылками для создания методов распыления металлического расплава с применением поступательно-вращающегося газового потока.

Библиографический список

1. **Терновой, Ю. Ф.** Полуфабрикаты и изделия из распыленных металлических порошков [Текст] / Ю. Ф. Терновой, Н. Н. Пашетнева, С. А. Воденников. – Запорожье : Изд-во ЗГИА, 2010. – 184 с.
2. **Ничипоренко, О. С.** Распыленные металлические порошки [Текст] / О. С. Ничипоренко, Ю. М. Найда, А. Б. Медведовский. – К. : Наукова думка, 1980. – 240 с.
3. **Marshall, W. R.** Principles of spray drying. Part 1. Fundamentals of spray-dryer operation [Text] / W. R. Marshall, E. Setzler // Chemical Engineering Progress. – 1950. – Vol. 46, No. 7. – Pp. 501-508.
4. **Федорченко, И. М.** Факторы, определяющие формообразование частиц порошка в процессе распыления газовым потоком [Текст] / И. М. Федорченко, О. С. Ничипоренко // Доклады АН СССР. – 1968. – Т. 179, № 3. – С. 578-580.
5. **Терновой, Ю. Ф.** Физико-математическая модель процесса газового распыления струи расплава [Текст] / Ю. Ф. Терновой, Н. Н. Пашетнева, Ю. В. Манегин // Порошковая металлургия. – 1991. – № 2. – С. 7-12.
6. **Magarvey, R. H.** Free fall breakup of zarge drops [Text] / R. H. Magarvey, B. W. Tayler // Journal of Applied Physics. – 1956. – Vol. 27, No. 10. – Pp. 1129-1135.
7. **Найда, Ю. И.** Изучение условий охлаждения распыленных металлических порошков и расчет габаритов распылительной камеры [Текст] / Ю. И. Найда, А. Б. Медведовский, Л. М. Динок и др. // Порошковая металлургия. – 1974. – № 7. – С. 6-10.
8. **Терновой, Ю. Ф.** Теоретические основы процессов распыления металлических расплавов [Текст] / Ю. Ф. Терновой, Г. А. Баглюк, С. С. Кудиевский. – Запорожье : РИО ЗГИА, 2008. – 298 с.

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

Воденніков Сергій Анатолійович, доктор технічних наук перший проректор, Запорізька державна інженерна академія (Запоріжжя, Україна). E-mail: s_vodennikov@i.ua

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

ОДЕРЖАННЯ МІКРОГРАНУЛ СФЕРИЧНОЇ ФОРМИ БЕЗ ЧАСТИНОК-САТЕЛІТІВ ПІД ЧАС ДИСПЕРГУВАННЯ МЕТАЛІЧНИХ РОЗПЛАВІВ ІНЕРТНИМ ГАЗОМ

Розглянуто теоретичні закономірності формоутворення мікрогранул при розпиленні металевих розплавів інертним газом. Визначено основні фактори, що впливають на форму одиничних частинок порошку.

Ключові слова: розпилення, інертний газ, мікрогранула, частиця-сателіт, фактори формоутворення

Ternovyi Yurii, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of the Metallurgy, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Zaporizhzhia, Ukraine). E-mail: ferrous.metals@ukr.net

Vodennikov Sergiy, Doctor of Technical Sciences, first pro-rector, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Zaporizhzhia, Ukraine). E-mail: s_vodennikov@i.ua

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

MAKING OF MICROGRANULES OF SPHERICAL FORM WITHOUT PARTICLE-SATELLITES DURING DISPERSING OF METALLIC FUSIONS BY RARE GAS

The theoretical regularities of the formation of microgranules during the spraying of metallic melts by an inert gas are considered. The main factors, which influence the shape of individual powder particles, are determined.

Keywords: atomization, inert gas, microgranule, particle-satellite, forming factors

Стаття надійшла до редакції 20.02.2018 р.
Рецензент, проф. Т.В. Критська

Текст даної статті знаходиться на сайті ЗДІА в розділі Наука
<http://www.zgia.zp.ua>