

## ОСОБЕННОСТИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ КАПЕЛЬНОЙ ФАЗЫ РАСПЛАВА

Д. Л. СТАСЕНКО

УО «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», пр. Октября, 48, 246746 г. Гомель, Беларусь.

*Представлены результаты исследований процесса центробежного диспергирования капельной фазы расплава поверхностью кристаллизатора. Выполнена корреляция теоретических и практических исследований. Показано, что при прочих равных условиях увеличение скорости вращения кристаллизатора и уменьшение первичного размера капли расплава ведет к монотонному уменьшению размеров получаемых частиц.*

### Введение

Центробежное распыление с подачей на диск металла из плавильной печи имеет ряд преимуществ по сравнению с другими способами центробежного распыления. Основным преимуществом этого метода является возможность гомогенизировать расплавленный металл непосредственно перед распылением. Данный способ позволяет регулировать температуру перегрева жидкого металла, а тем самым и температуру жидких капель в момент их отрыва от вращающегося диска. Известно, что температура перегрева влияет на микроструктуру получаемых частиц. Важным преимуществом этого способа является более широкий диапазон скоростей подачи расплава на вращающийся диск, чем при распылении вращающейся заготовки или методе вращающегося диска.

Анализ влияния параметров центробежного распыления на свойства порошкового материала и исследования метода получения металлических порошков центробежным распылением показывают [1–5], что механизм дробления расплавленного металла во многом подобен механизму дробления жидкостей. Процесс каплеобразования на вращающемся диске подвержен влиянию рабочих параметров и физических констант жидкого металла.

Процесс дробления капли расплава состоит в следующем [2]. После поступления капля расплава на поверхность вращающегося диска она движется к периферии, образуя на диске сферическую каплю. В момент отрыва от диска под действием центробежных сил капля связана с основным металлом тонкой нитью, которая потом быстро распадается, образуя вторичную каплю-спутник [1, 5] (рис. 1).

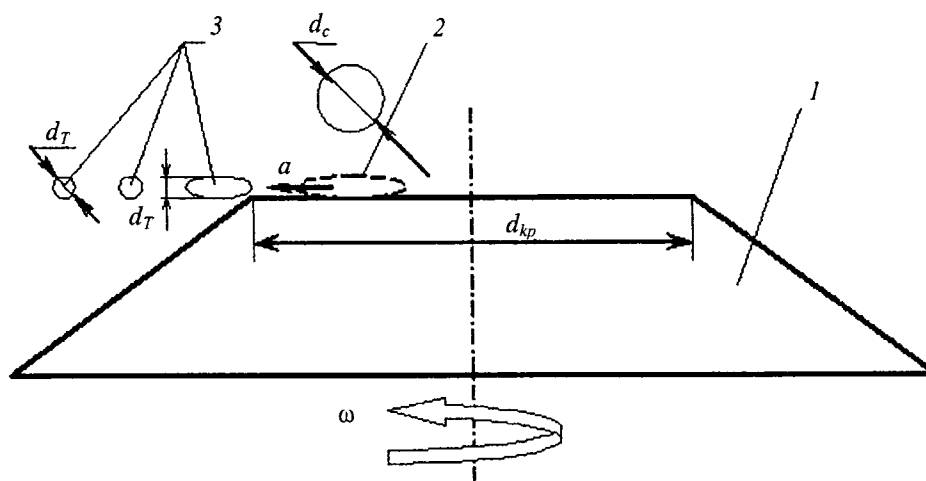


Рис. 1. Схема дробления капель расплава центробежным кристаллизатором: 1 – центробежный кристаллизатор; 2 – растекшаяся капля расплава; 3 – раздробленные фрагменты первичной капли расплава

Цель данной работы – исследование особенностей диспергирования капельной фазы расплава поверхностью вращающегося диска, теоретический анализ процессов, сопровождающих процесс диспергирования, анализ размеров получаемых порошков.

### Материалы и методы исследований

В качестве тигля для плавления металла использовались кварцевые трубки с капиллярным отверстием диаметром 0,1–0,9 мм. Капиллярное отверстие в кварцевом тигле получали путем торцевого шлифования запаянной трубки на алмазном круге. Размер отверстия измеряли с помощью металлографического микроскопа и используя калиброванную проволоку. Для плавления металла использовался высокочастотный генератор модели ВЧГ-60/0,443. Температура расплава фиксировалась с помощью прецизионного пирометра «Крок-2» с погрешностью измерения  $\pm 2$  °С. В качестве исходного материала для диспергирования были выбраны бронза (Бр.ОФ10-1), инструментальная углеродистая сталь (У8), нержавеющая сталь (12Х18Н10).

Определялся гранулометрический состав полученных изделий методом разделения (ситовый анализ) на микропрецизионных ситах. Использовали проволочные сита с характеристиками в соответствии с ГОСТ 18318–94. Набор сит устанавливали на специальное встряхивающее устройство и в течение 30 мин производили рассев. После этого производили замер массы каждой отдельной фракции на электронных весах ВРЛ-200 с точностью  $\pm 0,01$  г.

### Результаты исследований и их обсуждение

Результатом капельного распыления является бимодальное распределение размеров получаемых частиц. Вторичные частицы составляют небольшую часть общей массы порошкового материала, но их число приблизительно равно числу основных частиц (рис. 1). Таким образом, вторичные частицы образуются из каждой основной капли, полученной предварительным газовым диспергированием струи расплава. По мере увеличения размеров первоначальной капли, попадающей на поверхность вращающегося диска, они вытягиваются, образуя тонкие нестабильные струи, которые, отрываясь от кромки на некотором расстоянии, дробятся на капли. Размер струи может увеличиваться до предельного значения, которое зависит от скорости вращения диска. Увеличение размеров первоначальной капли вызывает увеличение диаметра струй [2]. Форма получаемых частиц порошкового материала при переходе из области капельного распыления в область струйного дробления изменяется. В первом случае образуются частицы с формой близкой к сферической, а во втором – эллипсоидные, т. е. вытянутой формы, образовавшиеся из жидкой струи

расплава, затвердевшей до начала или в процессе сфероидизации [6, 7].

При подаче капель расплава больших объемов на диск возможна ситуация, при которой толщина струи далее увеличиваться не может. В этом случае капли образуются из пленки. И в данном случае от кромки диска отрывается свободная пленка жидкости. Поверхность ее не устойчива, поэтому пленка дробится. По сравнению с механизмом капельного и струйного дробления, пленочное распыление – наименее контролируемый процесс, в большей степени он зависит от аэродинамических условий окружающей среды, особенно при больших скоростях вращения, т. е. при малом времени контакта с поверхностью диска. Переход от одного механизма дробления к другому зависит от рабочих параметров процесса и физических свойств распыляемого расплава. Для установления критериев перехода от механизма распыления струи к механизму распыления пленок и обратно используют размерный анализ [3, 4, 6].

Критерий Хинзе-Мильборна, позволяющий определить области превалирующего механизма распыления, можно представить в виде [3]:

$$Hi = \frac{\mu_l^{0,17} V_k \rho_l^{0,71} \omega^{0,6}}{\gamma_l^{0,88} a_{kp}^{0,68}}, \quad (1)$$

где  $\mu_l$  – коэффициент динамической вязкости;  $V_k$  – скорость подачи расплава на поверхность диска;  $\rho_l$  – плотность жидкости;  $\gamma_l$  – коэффициент поверхностного натяжения;  $\omega$  – угловая скорость диска;  $d_{kp}$  – диаметр диска. Капельное распыление реализуется при выполнении условия  $Hi < 0,07$ ; струйное – при выполнении условия  $0,07 < Hi < 1,33$ ; пленочное –  $Hi > 1,33$ .

Рассмотрим зависимость размеров получаемых частиц от рабочих параметров процесса. Коэффициент поверхностного натяжения расплава можно определить из уравнения [5]:

$$\gamma_l = d_c^2 a \rho_l / 6, \quad (2)$$

где  $d_c$  – размер частицы;  $a$  – ускорение, которое можно определить из выражения:

$$a = \omega^2 d_{kp} / 2. \quad (3)$$

Из уравнений (2) и (3) можно получить выражение для определения теоретического диаметра капли, образованной под действием центростремительных сил:

$$d_T = 1/\omega \sqrt{12\gamma_l / \rho_l d_{kp}}. \quad (4)$$

Если выразить размер капли в микрометрах, то получаем следующую зависимость:

$$d_T = 3,46 \cdot 10^6 / \omega \sqrt{\gamma_l / \rho_l d_{kp}}. \quad (5)$$

Этот идеализированный случай дает основное соотношение:

**Цель данной работы** – исследование особенностей диспергирования капельной фазы расплава поверхностью вращающегося диска, теоретический анализ процессов, сопровождающих процесс диспергирования, анализ размеров получаемых порошков.

### Материалы и методы исследований

В качестве тигля для плавления металла использовались кварцевые трубки с капиллярным отверстием диаметром 0,1–0,9 мм. Капиллярное отверстие в кварцевом тигле получали путем торцевого шлифования запаянной трубки на алмазном круге. Размер отверстия измеряли с помощью металлографического микроскопа и используя калиброванную проволоку. Для плавления металла использовался высокочастотный генератор модели ВЧГ-60/0,443. Температура расплава фиксировалась с помощью прецизионного пирометра «Крок-2» с погрешностью измерения  $\pm 2$  °С. В качестве исходного материала для диспергирования были выбраны бронза (Бр.ОФ10-1), инструментальная углеродистая сталь (У8), нержавеющая сталь (12Х18Н10).

Определялся гранулометрический состав полученных изделий методом разделения (ситовый анализ) на микропрецизионных ситах. Использовали проволочные сита с характеристиками в соответствии с ГОСТ 18318–94. Набор сит устанавливали на специальное встряхивающее устройство и в течение 30 мин производили рассев. После этого производили замер массы каждой отдельной фракции на электронных весах ВРЛ-200 с точностью  $\pm 0,01$  г.

### Результаты исследований и их обсуждение

Результатом капельного распыления является бимодальное распределение размеров получаемых частиц. Вторичные частицы составляют небольшую часть общей массы порошкового материала, но их число приблизительно равно числу основных частиц (рис. 1). Таким образом, вторичные частицы образуются из каждой основной капли, полученной предварительным газовым диспергированием струи расплава. По мере увеличения размеров первоначальной капли, попадающей на поверхность вращающегося диска, они вытягиваются, образуя тонкие нестабильные струи, которые, отрываясь от кромки на некотором расстоянии, дробятся на капли. Размер струи может увеличиваться до предельного значения, которое зависит от скорости вращения диска. Увеличение размеров первоначальной капли вызывает увеличение диаметра струй [2]. Форма получаемых частиц порошкового материала при переходе из области капельного распыления в область струйного дробления изменяется. В первом случае образуются частицы с формой близкой к сферической, а во втором – эллипсоидные, т. е. вытянутой формы, образовавшиеся из жидкой струи

расплава, затвердевшей до начала или в процессе сфероидизации [6, 7].

При подаче капле расплава больших объемов на диск возможна ситуация, при которой толщина струи далее увеличиваться не может. В этом случае капли образуются из пленки. И в данном случае от кромки диска отрывается свободная пленка жидкости. Поверхность ее не устойчива, поэтому пленка дробится. По сравнению с механизмом капельного и струйного дробления, пленочное распыление – наименее контролируемый процесс, в большей степени он зависит от аэродинамических условий окружающей среды, особенно при больших скоростях вращения, т. е. при малом времени контакта с поверхностью диска. Переход от одного механизма дробления к другому зависит от рабочих параметров процесса и физических свойств распыляемого расплава. Для установления критериев перехода от механизма распыления струи к механизму распыления пленок и наоборот используют размерный анализ [3, 4, 6].

Критерий Хинзе-Мильборна, позволяющий определить области преобладающего механизма распыления, можно представить в виде [3]:

$$Hi = \frac{\mu_l^{0,17} V_k \rho_l^{0,71} \omega^{0,6}}{\gamma_l^{0,88} d_{kp}^{0,68}}, \quad (1)$$

где  $\mu_l$  – коэффициент динамической вязкости;  $V_k$  – скорость подачи расплава на поверхность диска;  $\rho_l$  – плотность жидкости;  $\gamma_l$  – коэффициент поверхностного натяжения;  $\omega$  – угловая скорость диска;  $d_{kp}$  – диаметр диска. Капельное распыление реализуется при выполнении условия  $Hi < 0,07$ ; струйное – при выполнении условия  $0,07 < Hi < 1,33$ ; пленочное –  $Hi > 1,33$ .

Рассмотрим зависимость размеров получаемых частиц от рабочих параметров процесса. Коэффициент поверхностного натяжения расплава можно определить из уравнения [5]:

$$\gamma_l = d_c^2 a \rho_l / 6, \quad (2)$$

где  $d_c$  – размер частицы;  $a$  – ускорение, которое можно определить из выражения:

$$a = \omega^2 d_{kp} / 2. \quad (3)$$

Из уравнений (2) и (3) можно получить выражение для определения теоретического диаметра капли, образованной под действием центробежных сил:

$$d_T = 1/\omega \sqrt{12\gamma_l / \rho_l d_{kp}}. \quad (4)$$

Если выразить размер капли в микрометрах, то получаем следующую зависимость:

$$d_T = 3,46 \cdot 10^6 / \omega \sqrt{\gamma_l / \rho_l d_{kp}}. \quad (5)$$

Этот идеализированный случай дает основное соотношение:

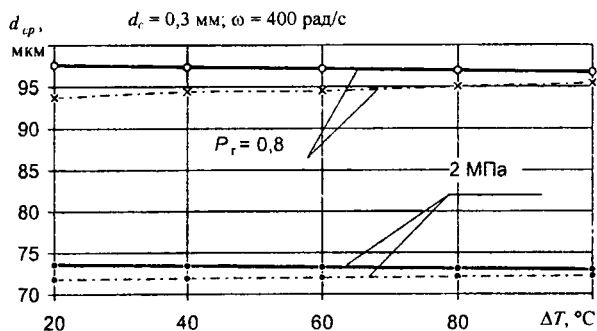


Рис. 5. Изменение среднего диаметра частиц порошка от температуры перегрева расплава: --- расчетный; — экспериментальный

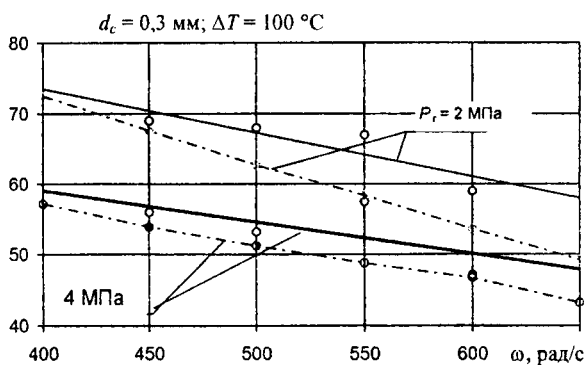


Рис. 6. Изменение среднего диаметра веретенообразных частиц от скорости вращения центробежного кристаллизатора: --- расчетный; — экспериментальный

бежное диспергирование капель расплава обеспечивает вторичное дробление продуктов диспергирования полученных газовым распылением струи расплава, а погрешность расчетных данных относительно экспериментальных не превышает в интервале 400–700 рад/с – 10%.

### Заключение

Показано, что при получении порошков методом центробежного диспергирования расплава имеют место механические явления дробления расплава (критерий Хинзе-Мильборна, коэффициент поверхностного натяжения), оказывающие существенное влияние на геометрические размеры и форму получаемых порошков. Экспериментально установлено, что размеры частиц получаемых дисперсных порошков зависят от свойств распыляемого материала, диаметра центробежного кристаллизатора и его угловой скорости вращения, а также от исходного размера капли расплава и величины его перегрева, обуславливающего изменение свойств расплава.

Причем при прочих равных условиях увеличение температуры перегрева расплава практически не влияет на конечные размеры частиц порошка, а увеличение скорости вращения кристаллизатора и уменьшение первичного размера капли расплава ведет к монотонному уменьшению их размеров.

### Обозначения

$\mu_l$  – коэффициент динамической вязкости;  $V_k$  – скорость подачи расплава на поверхность диска;  $\rho_l$  – плотность жидкости;  $\gamma_l$  – коэффициент поверхностного натяжения;  $\omega$  – угловая скорость диска;  $d_{kp}$  – диаметр диска;  $d_{cp}$ ,  $d_T$  – размер частицы экспериментальный и теоретический соответственно;  $a$  – ускорение капли расплава;  $g$  – ускорение свободного падения;  $d_c$  – диаметр капли расплава до контакта с поверхностью центробежного кристаллизатора;  $P_2$  – давление газа энергоносителя в распылителе струи расплава;  $\Delta T$  – температура перегрева расплава выше температуры плавления.

### Литература

1. Shepard, A. F., Henne A. L. // J. Amer. Chem. Soc., 1961, 53,5 p. 1948.
2. Walton, W. H. The production of sprays and mists of uniform drop size by means of spinning disc type sprayers / W. H. Walton, W. C. Prewett // The Proc. Phys. Soc. – 1949. – B62. – P. 341–350.
3. Hinze, J. O. Atomization of liquids by means of a rotating cup / J. O. Hinze, H. Milborn // J. Appl. Mech. – 1950. – 17. – P. 145–153.
4. Friedman, S. J. Centrifugal disk atomization / S. J. Friedman, F. A. Gluckert, W. R. Marshall // Chem. Eng. Progr. – 1952. – 48. – P. 181–191.
5. Fraser, B. P. Liquid atomization and the drop size of sprays / B. P. Fraser, P. Eiseklam // Transact. Ins. Chem. Eng. – 1956. – 34. – P. 294–319.
6. Fraser, R. P. The filming of liquids by spinning cups / R. P. Fraser, N. Dombrowski, J. H. Routleg // Chem. Eng. Sci. – 1963. – 18. – P. 323–337.
7. Bär P. Uder die physikalischen grundlagen der yerstäubung-strocknung: Doctorate Dissertation. Technical College Karlsruhe. – 1935.
8. Champagne, B. Characteristics of powders produced by the rotating electrode process / B. Champagne, R. Angers, M. Fiset // Metal Powder Report. – 1984. – 39. – P. 267–270.
9. Wentzeill, J. M. Particle size production from the spinning disk atomizer / J. M. Wentzeill // Powder Metal. Int. – 1986. – 18. – P. 16.
10. Loewenstein, P. Superclean superalloy powders / P. Loewenstein // Metal Powder Report. – 1981. – 36. – P. 59–64.
11. Гиршов, В. Л. Центробежное распыление металлических расплавов с охлаждением частиц в жидкостной среде / В. Л. Гиршов, Ю. Н. Силаев, Е. Д. Орлов, Ю. Л. Самочинков // Порошковая металлургия. – 1985. – № 2. – С. 1–8.

Stasenko D. L.

Features of centrifugal dispersion of drop phase of melt.

Results of researches of process of centrifugal crushing of a drop phase of the fused metal alloy are presented by a surface of a crystallizer. Correlation of theoretical and practical researches is executed. It is shown, that with other things being equal the increase in speed of rotation of a crystallizer and reduction of the primary size of a drop of the fused metal alloy conducts to monotonous reduction of received powder particles.

Поступила в редакцию 02.09.2008.

© Д. Л. Стасенко, 2009