

## ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДИСПЕРСНОСТИ ПОРОШКОВ МЕТАЛЛОВ ПРИ РАСПЫЛЕНИИ РАСПЛАВОВ

В.А. Архипов, С.С. Бондарчук, А.И. Коноваленко

*Научно-исследовательский институт прикладной математики  
и механики Томского государственного университета  
634050, г. Томск, Россия*

В металлургии для производства высокодисперсных порошков из расплавов легких металлов широкое распространение получила технология газового распыления с использованием эжекционных форсунок благодаря простоте конструкции форсунки, надежности в работе и саморегулируемости отношения расхода металла к расходу газа. Например, распыление расплава алюминия, имеющего температуру  $900\div 1000$  °С проводят азотом, нагретым до температуры  $600\div 650$  °С [1]. При этих условиях выход мелкой фракции (с размером частиц менее 10 мкм) составляет порядка 25%. В связи с ужесточением требований по дисперсности получаемого пульверизата, актуальна задача увеличения выхода мелкодисперсной фракции.

Практика показывает, что газодинамическое диспергирование расплавов горячим газом имеет ограничение по дисперсности получаемых порошков обусловленное повышением устойчивости капель малого диаметра в потоке газа. Уменьшение дисперсности получаемых порошков увеличением температуры или давления распыляющего газа является затратным путем, т. к. издержки производства растут быстрее, чем увеличивается выход мелкой фракции порошка.

Известно увеличение дисперсности распыла при воздействии ультразвуковых колебаний на процесс диспергирования [2]. При этом можно выделить два механизма влияния ультразвука на процесс диспергирования: изменение условий обмена на границе раздела газ-жидкость при генерировании ультразвуковых колебаний в газе и распад самой струи (пленки) жидкости под действием капиллярных сил при генерировании ультразвуковых колебаний в жидкости.

В первом случае явление распыления жидкости (разрушение ее поверхности с образованием большого числа мелких капель) связано с возрастанием амплитуды и появлением неустойчивости коротких волн на поверхности жидкости при динамическом воздействии газового потока. Анализ задачи о распаде струи жидкости высокоскоростным обдувающим потоком газа показал [3], что инкремент колебаний поверхности жидкости имеет максимум при значении волнового числа:

$$k_{\max} = \frac{2\pi}{\lambda_{\max}} = \frac{2}{3} \frac{\rho u_g^2}{\sigma}, \quad (1)$$

где  $\lambda_{\max}$  – длина волны наиболее неустойчивых колебаний;

$u_g$  – относительная скорость газа и струи у поверхности жидкости;

$\rho$  – плотность газа;

$\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

Из уравнения (1) следует выражение для частоты колебаний наиболее неустойчивых коротких волн:

$$f_{\max} = \frac{u_g}{\lambda_{\max}} = \frac{\rho u_g^3}{3\pi\sigma} . \quad (2)$$

При движении газа относительно поверхности жидкости в газе образуется турбулентный пограничный слой. Амплитуда волн (шероховатостей) на поверхности жидкости  $\zeta$  и скорость газа в ядре потока  $u$  (равная скорости газа на выходе из сопла форсунки) связаны со скоростью газа у поверхности жидкости соотношением:

$$u = u_g \ln \frac{\delta}{\zeta} ,$$

где  $\delta$  – характерный размер струи жидкости. Амплитуда начальных возмущений на поверхности жидкости обычно не превосходит  $\zeta = 10^{-2}\delta$  [3], поэтому скорость газа у поверхности жидкости  $u_g = 0.217 u$ . Подставляя это значение в (2), получим значение частоты колебаний, оказывающих максимальное возмущающее воздействие на струю жидкости (расплава):

$$f = f_{\max} = 1.1 \cdot 10^{-3} \frac{\rho u^3}{\sigma} . \quad (3)$$

Расчеты показывают, что для условий диспергирования расплава алюминия значение частоты колебаний составляет величину порядка 90 кГц.

Для генерации колебаний с такой частотой предлагается использовать явление возникновения колебаний в пластине, защемленной с одного конца, при обдуве ее газовым потоком. При движении газа вдоль пластины она начинает колебаться с собственной частотой, определяемой ее размерами и физическими свойствами материала [4]:

$$f = \pi^2 \sqrt{\frac{D}{\rho_p h} \left\{ \frac{G_x^4}{a^4} + \frac{G_y^4}{b^4} + \frac{2}{a^2 b^2} [v H_x H_y + (1-v) J_x J_y] \right\}} , \quad (4)$$

где  $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$  – цилиндрическая жесткость пластины;

$E$  – модуль упругости;

$\nu$  – коэффициент Пуассона;

$\rho_p$  – плотность пластины;

$a, b, h$  – длина, ширина и толщина пластины соответственно;

$G_x, G_y, H_x, H_y, J_x, J_y$  – коэффициенты, зависящие от условий закрепления пластины и моды колебаний.

Для продольных колебаний защемленной с одного края пластины и первой моды выражение (4) упрощается ( $G_x=0.597, H_x = -0.087, G_y = H_y = 0, J_x= 0.471, J_y= 12/\pi^2$ ) и имеет вид:

$$f = \frac{h}{a^2} \sqrt{\frac{E}{\rho_p(1-\nu^2)} \left[ 1 + 9(1-\nu) \frac{a^2}{b^2} \right]} .$$

Выбором материала пластины ( $E, \rho_p, \nu$ ) и ее геометрических размеров ( $a, b, h$ ) можно добиться, чтобы частотный диапазон собственных колебаний пластины располагался в области частот, близких к частоте максимального возмущающего воздействия на по-

верхность струи расплава (3), тем самым обеспечивая ее эффективное разрушение (диспергирование) [5].

Второй механизм воздействия ультразвука на процесс диспергирования связан с ускорением распада струи жидкости под действием капиллярных сил. Анализ задачи о распаде струи жидкости под действием капиллярных сил показал [3], что инкремент колебаний поверхности жидкости имеет максимум при значении волнового числа  $k=2\pi/\lambda$ , где  $\lambda$  длина волны, равном

$$k = k_{\max} = \left[ 2\delta^2 + \frac{\mu\delta}{\rho} \sqrt{\frac{\rho\delta}{2\sigma}} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

где  $\delta$  – толщина струи (пленки) расплава;

$\mu$  – коэффициент динамической вязкости расплава.

Из уравнения (5) следует выражение для длины волны колебаний:

$$\lambda_{\max} = 2\pi \left[ 2\delta^2 + \frac{\mu\delta}{\rho} \sqrt{\frac{\rho\delta}{2\sigma}} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

Подставляя в (6) связь длины волны с частотой колебаний  $\lambda_{\max} = u/f_{\max}$ , получим уравнение для частоты колебаний, обеспечивающей наилучшие условия распада пленки жидкости:

$$f = \frac{u}{2\pi\delta} \left[ 2 + \sqrt{\frac{\mu^2}{2\sigma\rho\delta}} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (7)$$

При распылении расплава алюминия при температуре  $800^{\circ}\text{C}$  ( $\rho=2360$  кг/м<sup>3</sup>,  $\mu=0.0014$  Па·с,  $\sigma=0.84$  Н/м) и толщине пленки  $\delta=0.5$  мм, движущейся со скоростью  $u=5$  м/с, оптимальное значение частоты колебаний, рассчитанное по формуле (7), составляет  $f=1.1$  кГц. Для практической реализации этого метода ультразвукового воздействия на процесс диспергирования предлагается использовать вставку из пьезоэлектрического материала в канале подачи расплава [6].

Использование рассмотренных методов ультразвукового воздействия на процесс диспергирования расплавов позволит увеличить выход мелкодисперсной фракции в пульверизате без изменения технологических параметров.

*Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект №15-19-10014).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arkhipov V.A., Evsevleyev M.Ya., Zharova I.K., Zhukov A.S., Zmanovsky S.V., Kozlov E.A., Konovalenko A.I. Influence of duty parameters and design of ejection nozzle on characterizes of aluminum's dispersed powder // Powder metallurgy and functional coverings. Part 1. Influence of duty parameters of nozzle 2014. № 4. P. 8-12.
2. Arkhipov V.A., Evsevleyev M.Ya., Zharova I.K., Zhukov A.S., Zmanovsky S.V., Kozlov E.A., Konovalenko A.I. Influence of duty parameters and design of ejection nozzle on characterizes of aluminum's dispersed powder // Powder metallurgy and functional coverings. Part 2. Influence of the nozzle design. 2015. № 1. P. 3-7.
3. Levich V.G. Physical and chemical hydrodynamics. Moskow, 1950.
4. Gontkevich V.S. Own fluctuations of plates and covers. Kiev, 1964.
5. Patent RU № 2559080. Way of receiving metal powders dispersion of fusions/ Arkhipov V.A., Bondarchuk S.S., Zhukov A.S., Zmanovsky S.V., Konovalenko A.I., Litvinov A.V., Pavlov M.S.
6. Patent RU № 2559080. Nozzle for dispersion of the melted metals / Arkhipov V.A., Evsevleyev M.Ya., Zhukov A.S., Zmanovsky S.V., Konovalenko A.I., Litvinov A.V.