

## ОХЛАЖДЕНИЕ И ЗАТВЕРДЕВАНИЕ КАПЛИ РАСПЛАВА ПРИ УДАРНОМ ДИСПЕРГИРОВАНИИ

Канд. техн. наук АБРАМЕНКО А. Н., канд. техн. наук, доц. КАЛИНИЧЕНКО А. С.,  
канд. физ.-мат. наук КРИВОШЕЕВ Ю. К., инж. ВОРОНИН Е. А.

*Белорусская государственная политехническая академия*

В настоящее время в промышленности широко применяются порошковые материалы размером менее 200 мкм. Для их получения существуют различные методы диспергирования. Одним из таких способов является метод ударного диспергирования. В этом процессе струя расплавленного металла, истекающая из сопла, разбивается зубьями, сформированными по периферии вращающегося вала [1]. На образующую каплю расплава действуют силы инерции, гравитации и поверхностного натяжения. Силы поверхностного натяжения стремятся стянуть жидкую частицу в сферу, остальные — расплющить ее. На основании баланса этих сил определится радиус сферической частицы.

Для получения качественных порошков необходимо, чтобы после соударения расплава с зубьями вала диспергированная частица оставалась жидкой в течение времени, достаточного для стягивания в сферу. Затвердевание такой частицы происходит в полете. В контейнер должны попадать частицы в твердом состоянии. Если расплав недостаточно перегрет, то частица затвердевает при ее соударении с зубом, принимая плоскую форму. Если расплав при соударении избыточно перегрет, то образующиеся частицы не успевают затвердеть в полете и плющатся при ударе о стенку или днище контейнера. Поэтому задачей данного исследования является разработка для известной конструкции устройства диспергирования [2] методики расчета теплообмена частицы расплава с зубом при ударе и последующего охлаждения воздухом при полете с целью определения геометрических размеров установки.

Рассмотрим процесс ударного диспергирования жидкого металла. Расплав металла при температуре  $T_1$ , превышающей температуру его затвердевания, заливается в тигель, установленный выше вращающегося вала. Через выпускное отверстие установленного над валком тигля (для простоты примем отверстие круглого сечения) расплав истекает под действием сил гравитации на вращающийся зубчатый валок. Линейная скорость истечения расплава определяется из уравнения гидродинамики

$$V_p = \varphi \sqrt{2gh}.$$

Массовый расход расплава, приходящийся на один оборот вала, возможно определить из соотношения

$$M = \frac{A_m V_p \rho_p}{n},$$

а на один зуб приходится следующая масса жидкого металла:

$$m_z = \frac{M}{z}.$$

Для более эффективного процесса разбиения струи плоскость передней кромки обычно выполнена под некоторым углом к радиусу вала (рис. 1). В наших расчетах примем этот угол равным  $25^\circ$ . Практика показала, что наиболее эффективен удар по расплаву тогда, когда плоскость ножи зуба в момент соприкосновения со струей параллельна ее оси [3]. Струя расплава распределяется на поверхности вала в течение времени удара  $\tau_y = 0,001$  с [3]. За это время окружность вала проходит расстояние

$$\Delta l = V_0 \tau_y.$$

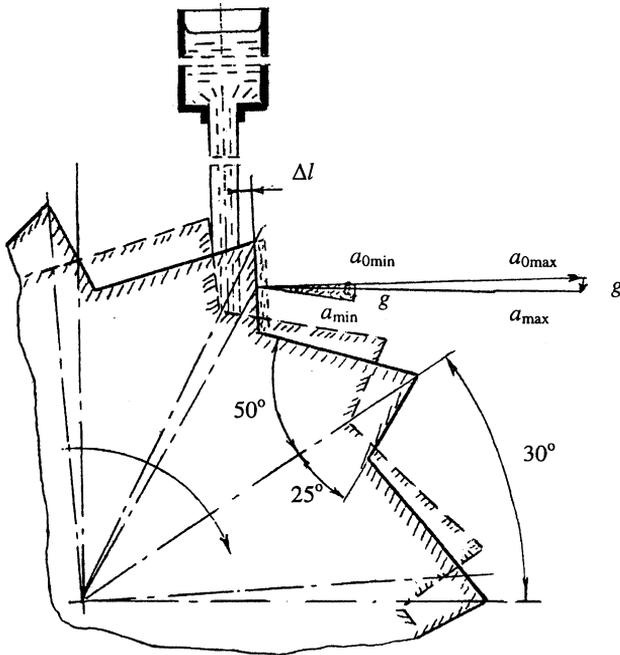


Рис. 1. Схема процесса ударного диспергирования

Величина диаметра образующейся частицы определяется балансом сил инерции и поверхностного натяжения, воздействующих на каплю в полете:

$$d_{ш} = 2 \sqrt{\frac{\sigma_p}{\rho_p a}}.$$

Суммарное ускорение, которое приобретает жидкометаллическая частица, равно

$$a = a_0 + g.$$

Окружное ускорение находится из соотношения

$$a_0 = \frac{kV_0}{\tau_y}.$$

Окончательно (рис. 2) имеем

$$d_{ш} = 2 \sqrt{\frac{\sigma_p}{\rho_p} \left[ \left( \frac{\tau_y}{kV_0} \right)^2 + \frac{1}{g^2} \right]},$$

где  $k$  — отношение скорости истечения расплава к скорости вращения зуба, равное 0,2—0,25 [5].

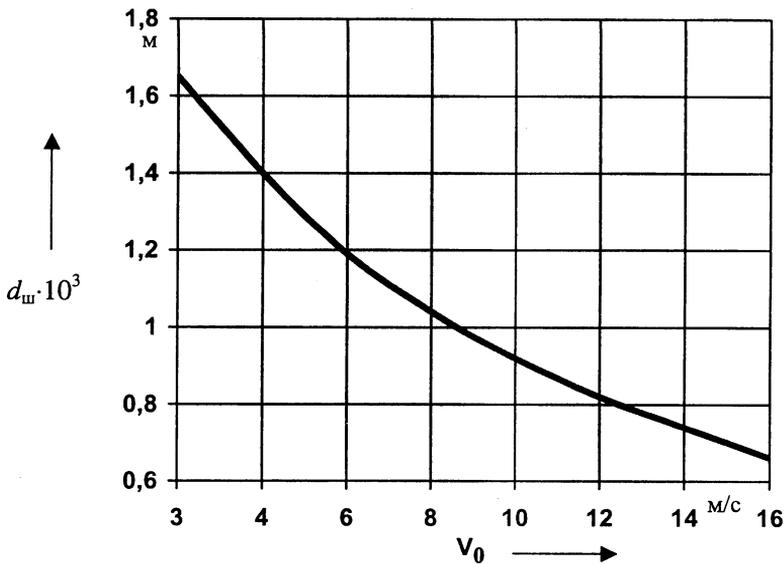


Рис. 2. Зависимость диаметра сферической частицы  $d_{ш}$  от окружной скорости вала  $V_0$

Исходя из этого оптимальная высота расплава в тигле составит

$$h = \frac{0,04V_0}{2\varphi g}. \quad (1)$$

Анализ показывает, что наиболее эффективно процесс диспергирования идет в случае, когда толщина слоя расплава по кромке зуба равна  $d_{ш}$ . Тогда:

$$\begin{aligned} m_z &= A_z d_{ш} \rho_p; \\ M &= A_z d_{ш} \rho_p z; \\ A_m &= \frac{A_z d_{ш} z n}{V_p}. \end{aligned} \quad (2)$$

Время истечения из тигля массы расплава

$$\tau_m = \frac{A_z d_{ш}}{V_p A_{ш}}. \quad (3)$$

Максимальный и минимальный углы отлета частиц при наибольшей и наименьшей скоростях вращения вала определяются из планов ускорений (рис. 1). Угол между составляющими векторов представляет собой угол рассеивания. Расплав, разбитый на капли, стягивается в сферические частицы, которые летят в контейнер, охлаждаясь на воздухе. Рассмотрим траекторию полета сферических частиц. Соппротивлением воздуха ввиду малости пренебрегаем. Тогда уравнения, описывающие траекторию полета, будут иметь вид:

в момент удара:

$$\begin{aligned} X &= 0; \\ Y &= H; \\ V_{ш} &= V_0; \end{aligned}$$

в полете:

$$\begin{aligned} X &= V_0 \tau; \\ Y &= \frac{g \tau^2}{2}; \\ V_{ш} &= \sqrt{V_0^2 + g^2 \tau^2}; \end{aligned}$$

в контейнере:

$$\begin{aligned} X &= l; \\ Y &= 0; \\ V_{ш} &= \sqrt{V_0^2 + g^2 \tau^2}. \end{aligned}$$

Длина траектории частицы за время полета в контейнер (рис. 3) вычисляется по формуле

$$S = \int_0^{\tau_k} V_0 \sqrt{1 - \frac{g^2 \tau_k^2}{V_0^2}} d\tau.$$

Средняя скорость частицы равна

$$V_{cp} = \frac{V_0 + \sqrt{V_0^2 + g^2 \tau_k^2}}{2}. \quad (4)$$

Величины высоты расположения вала относительно контейнера  $H$  и скорости  $V_0$  задаются.

Рассмотрим теплообмен капли с окружающей средой. Расплав, заливаемый в тигель, имеет температуру, превышающую температуру затвердевания на величину  $\Delta T$ , представляющую сумму падений температуры

$$\Delta T = \Delta T_m + \Delta T_y + \Delta T_{0x}.$$

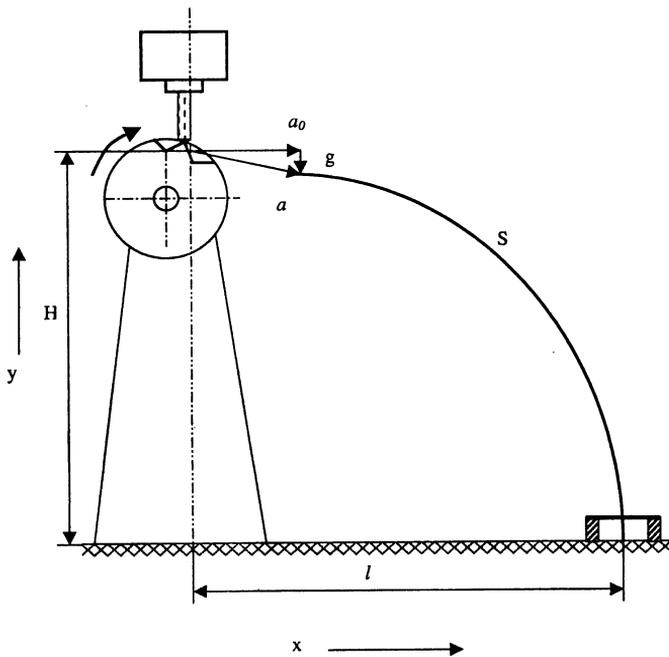


Рис. 3. Схема установки ударного диспергирования

От момента истечения до соприкосновения с валком падение температуры расплава стараются поддерживать для алюминия не более 10 К. Время истечения из литниковой коробки порции расплава, попадаемого на один зуб, определится, согласно (3). Интенсивность контактного теплообмена между слоем расплава и зубом при ударе находится из выражения

$$Q = \alpha_y (T_p - T_z) A_z = C_p m_z \Delta T_y \frac{1}{\tau_y}.$$

Значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha_y$  определяется теплопроводностью воздуха, заземленного в микронеровностях контактируемых поверхностей,

$$\alpha_y = \frac{\lambda_B}{R_z}.$$

Тогда

$$\Delta T_y = \frac{\lambda_B (T_p - T_z) A_z \tau_y}{R_z C_p m_z}. \quad (5)$$

После разбиения капля стягивается в шарик. Время стягивания [6] составляет

$$\tau_{ст} \approx \frac{d_{ш}}{2} \cdot \frac{\mu_p}{\sigma_p}.$$

Это время мало (для алюминия  $\tau_{ст} = 5 \cdot 10^{-5}$  с) и в дальнейших расчетах не учитывается. Падением температуры  $\Delta T_{ох}$  задаемся исходя из следующего:

$$\tau_{ох} \geq \tau_{ст}.$$

Время охлаждения жидкометаллической сферической частицы

$$\tau_{ох} = \frac{m_{ш} C_p \Delta T_{ох}}{\alpha (T_{ох} - T_B) A_{ш}}. \quad (6)$$

Коэффициент теплообмена между летящим шариком и воздухом определяется из уравнения вынужденного конвективного теплообмена [7]

$$Nu = \frac{\alpha d_{ш}}{\lambda_B} = 0,37 Re^{0,6} Pr^{1/3}, \quad (7)$$

отсюда

$$\alpha = \frac{\lambda_B}{d_{ш}} 0,37 \left( \frac{V_{ср} d_{ш}}{\nu_B} \right)^{0,6} Pr^{1/3}.$$

По значениям  $\Delta T_{ох}$  и  $\tau_{ох}$  эмпирически определяется скорость охлаждения и переохлаждения расплава ниже температуры кристаллизации  $\Delta T_{п}$  [8]. Время  $\tau_{п}$  рассчитывается аналогично  $\tau_{ох}$ . Выделение теплоты в процессе рекалесценции и подъем температуры до значения, соответствующего температуре кристаллизации, происходят практически мгновенно, так как процесс протекает адиабатно [9]

$$\tau_{рк} \approx 0,001 \text{ с.}$$

Время кристаллизации рассчитывается по формуле

$$\tau_{кр} = \frac{m_{ш} r}{\alpha (T_{кр} - T_B) A_{ш}} - \tau_{рк}. \quad (8)$$

После кристаллизации частица продолжает охлаждаться в полете до попадания в контейнер. Это время составляет

$$\tau_{кн} = \tau_k - (\tau_{ох} + \tau_{п} + \tau_{рк} + \tau_{кр}).$$

**Пример** расчета интенсивности охлаждения при полете капли в воздухе. Валок устройства имеет диаметр 0,4 м и содержит 12 зубов. Рассмотрим процесс охлаждения алюминиевой капли диаметром

$d_{ш} = 1 \cdot 10^{-3}$  м. Необходимая высота металлического напора находится из (1). Окружную скорость вала примем  $V_0 = 7$  м/с. Скорость истечения расплава из тигля, согласно (2),  $V_p = 1,4$  м/с и для круглого сечения струи  $\phi = 0,9$ . Тогда  $h = 0,25$  м.

Площадь отверстия литниковой коробки (2) при  $z = 12$ ;  $n = 5,6$  с $^{-1}$ ;  $A_z = 0,02 \cdot 0,1 = 0,002$  м $^2$  равняется  $A_{ш} = 9,6 \cdot 10^{-5}$  м $^2$ .

Время истечения расплава из тигля, согласно (3),  $\tau_m = 0,015$  с. Падение температуры  $\Delta T_m = 10$  К. При времени удара  $\tau_y = 0,001$  с мы имеем  $\Delta l = 0,007$  м. Средняя скорость частицы расплава в полете, определяемая из (4),  $V_{cp} = 7,87$  м/с. При высоте расположения вала над уровнем контейнера время полета составляет  $\tau_k = 1,01$  с, длина отлета  $l = 3,87$  м, длина траектории полета  $S = 5,01$  м.

Падение температуры в процессе ударного диспергирования (5) при значениях  $R_z = 3,2$  мкм;  $T_p = 685$  °С и  $T_z = 20$  °С равно  $\Delta T_y = 14$  К.

Коэффициент теплообмена (7)  $\alpha = 350$  Вт/(м $^2$ ·К).

Время охлаждения при  $\Delta T_{ох} = 10$  К (6)

$$\tau_{ох} = 0,2 \cdot 10^{-3} \geq 5 \cdot 10^{-5} \text{ с.}$$

Время переохлаждения расплава при  $\Delta T_{п} = 35$  К

$$\tau_{п} = 0,07 \text{ с.}$$

Время рекалесценции до  $T_{кр} = 660$  °С

$$\tau_{рк} = 0,001 \text{ с.}$$

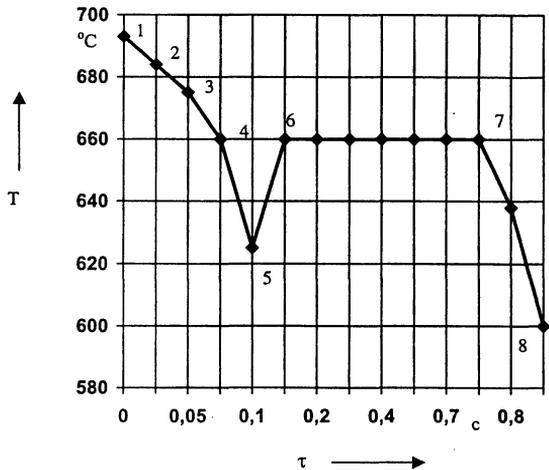
Время кристаллизации при  $T_{кр} = 660$  °С (8)

$$\tau_{кр} = 0,57 \text{ с.}$$

Время охлаждения затвердевшей сферической частицы в полете до момента попадания в контейнер  $\tau_{кн} = 0,35$  с.

Температура частицы при попадании в контейнер равна  $T_{кн} = 485$  °С.

Рис. 4. Временное изменение температуры частицы: 1–2 – охлаждение расплава в тигле ( $\Delta T = 10$  К,  $\tau = 0,015$  с); 2–3 – ударное диспергирование ( $\Delta T = 14$  К,  $\tau = 0,001$  с); 3–4 – охлаждение капли расплава ( $\Delta T = 10$  К,  $\tau = 0,02$  с); 4–5 – переохлаждение ( $\Delta T = 35$  К,  $\tau = 0,07$  с); 5–6 – процесс рекалесценции ( $\Delta T = 35$  К,  $\tau = 0,001$  с); 6–7 – процесс кристаллизации ( $\Delta T = 0$  К,  $\tau = 0,57$  с); 7–8 – охлаждение твердой частицы ( $\Delta T = 175$  К,  $\tau = 0,349$  с). Конечная температура частицы – 485 °С



## ВЫВОД

Расчеты показали, что капля расплавленного металла успевает стянуться в сферу и охладиться до температуры достаточной прочности частиц при их попадании в контейнер и предотвращения их деформации (рис. 4). Во избежание спекания частиц необходимо совместить контейнер с транспортом для удаления их из горячей зоны.

## ОБОЗНАЧЕНИЯ

$A$  — площадь,  $m^2$ ;  $a$  — ускорение,  $m/c^2$ ;  $c$  — теплоемкость,  $Dж/(кг \cdot K)$ ;  $h$  — высота металлостатического напора,  $m$ ;  $d$  — диаметр,  $m$ ;  $L$  — длина полета,  $m$ ;  $l$  — длина отлета,  $m$ ;  $\Delta l$  — расстояние от начала подачи расплава на валок до кромки зуба,  $m$ ;  $M$  — массовый расход расплава на один оборот вала,  $кг/с$ ;  $m$  — массовый расход расплава,  $кг/с$ ;  $n$  — частота вращения,  $c^{-1}$ ;  $Q$  — тепловой поток,  $Вт$ ;  $R_z$  — высота микронеровностей,  $m$ ;  $r$  — скрытая теплота кристаллизации,  $Dж/кг$ ;  $S$  — длина траектории полета частицы,  $m$ ;  $T$  — температура,  $K$ ;  $\Delta T$  — перепад температуры,  $K$ ;  $V$  — скорость,  $m/с$ ;  $z$  — число зубьев;  $\alpha$  — коэффициент теплообмена,  $Вт/(m^2 \cdot K)$ ;  $\lambda$  — теплопроводность,  $Вт/мк$ ;  $\nu$  — кинематическая вязкость,  $m^2/с$ ;  $\rho$  — плотность,  $кг/м^3$ ;  $\sigma$  — поверхностное натяжение,  $н/м$ ;  $\tau$  — время,  $с$ ;  $\varphi$  — коэффициент расхода;  $Nu$ ,  $Pr$  — критерии Нуссельта и Прандтля соответственно.

Индексы:  $v$  — воздух;  $k$  — контейнер;  $кн$  — конечное;  $кр$  — кристаллизация;  $m$  — тигель;  $o$  — окружная;  $ох$  — охлаждение;  $п$  — переохлаждение;  $p$  — расплав;  $рк$  — рекалесценция;  $ср$  — среднее;  $ст$  — стягивание;  $y$  — удар;  $z$  — зуб;  $ш$  — шарик.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Новое в получении материалов /А. И. Манохин, Д. М. Покаванов, К. А. Блинов и др. — М.: Машиностроение, 1990. — 448 с.
2. Устройство для получения дисперсных частиц /А. Н. Абраменко, А. С. Калининченко, Ю. К. Кривошеев, А. А. Никифоров. — Пол. решение РБ № 960340 от 26.03.99.
3. Wanibe Y., Itoh T., Matsui Y. Impact Atomization of Liquid Metals // Int. J. of Powder Metallurgy. — 1991. — V. 27. — № 3. — P. 195—209.
4. Назаров О. И., Поваров О. А., Ятчени И. А. Удар капли о плоскую двужущуюся пластину // Теплоэнергетика. — 1975. — № 4. — С. 47—49.
5. Гонор А. Л., Яковлев В. Я. Удар капли по твердой поверхности // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. — 1977. — № 5. — С. 151—152.
6. Гегузин Я. Е. Капля — М.: Наука, 1977. — 176 с.
7. Мартыненко О. Г., Соковишин Ю. А. Свободно-конвективный теплообмен. — Мн.: Наука и техника, 1982. — 399 с.
8. Мирошниченко И. С. Закалка из жидкого состояния. — М.: Металлургия, 1982. — С. 27—29.
9. Регерезко J. H., Furrer D. U. Undercooling of aluminum alloys // Dispersion Strengthened Aluminum Alloys. — USA, 1988. — P. 77—102.

Представлена кафедрой  
промтеплоэнергетики  
и теплотехники

Поступила 28.04.1999