

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ ЧАСТИЦ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ ПРИ РАСПЫЛЕНИИ РАСПЛАВОВ

© А. Ф. Санин, Е. А. Джур, С. А. Божко

Дніпропетровський національний університет

Введение. Физические и технологические свойства исходных порошков оказывают определяющее влияние на процессы формирования макро- и микро-структуры, фазовый состав, дисперсность структурных составляющих изготавливаемых материалов, уровень остаточной пористости, ее распределение и в конечном счете — на их механические и эксплуатационные характеристики.

Гранулометрический состав, определяющий размер частиц и вид функции распределения частиц по размерам, является чрезвычайно важным свойством, оказывающим влияние на текучесть и насыпную плотность, поведение порошков при прессовании, температурные параметры и кинетику спекания, образование и эволюцию жидкой фазы, на формирование структуры получаемого материала и его свойства.

Размер частицы порошка, полученного распылением расплава водой, определяется размером капли расплава, из которой она образовалась при кристаллизации. В свою очередь, образование капель определенного размера происходит при разрушении струи металлического расплава под воздействием струи энергоносителя на отдельные пряди и последующих многостадийных деформации и дроблении первичных прядей и формирующихся капель [1, 2].

Деформация капли сдерживается силами поверхностного натяжения и вязкого течения. Механизм дробления определяется изменением суммарной поверхностной энергии системы, которое зависит от величины энергии, передаваемой капле струей энергоносителя. В общем виде зависимость минимального размера капли, которая может разделиться, от скорости потока воды ω и свойств расплава при разных механизмах дробления может быть описана выражением $d_{\min} = We\sigma/(\rho_s\omega^2)$, где d_{\min} — диаметр капли, σ — поверхностное натяжение расплава, ρ_s — эффективная плотность энергоносителя, We — критерий Вебера [1, 3].

Значит, вероятность разрушения под воздействием распыляющего потока будет различна для капель разного размера. С уменьшением размера металлических капель величина скорости потока, вызывающего их дробление, будет возрастать [1, 3—5]. Существует минимальный критический размер, при котором жидкая капля расплава является устойчивой и не может быть разрушена потоком воды при фиксированном давлении и скорости. Определение этого размера при разных условиях распыления является важной задачей с точки зрения прогнозирования и управления фракционным составом распыленных порошков.

Постановка задачи. Основной целью данной работы являлось установление особенностей разрушения струи металлического расплава, деформации и дробления капель под воздействием струи воды давлением более 10 МПа в условиях пленочного кипения на поверхности капель. Принималось, что процессы деформации и дробления имеют место во время нахождения капли в жидком состоянии и завершаются либо в момент ее кристаллизации, либо если ее размер меньше критического. Для оценки влияния энергетических параметров распыления на гранулометрический состав порошков в качестве зависимой величины использован минимальный размер капли, которая может испытать акт деления при воздействии струи энергоносителя.

Под воздействием паровой оболочки капля расплава может деформироваться и разрушаться по двум основным механизмам, преобладающее влияние которых зависит от энергетических и скоростных параметров паровой пленки. Если скорость движения пленки достигает некоторого критического значения, которое можно назвать первой критической скоростью, то деление капли возможно с образованием 2—4 новых капель. При увеличении скорости движения оболочки и достижении второй критической скорости деление капли происходит по механизму «взрыва» с образованием 10—15 мелких капель.

Результаты. Если при распылении расплавов на поверхности прядей и капель при взаимодействии с водой реализуется устойчивое пленочное кипение, то на жидкую каплю фактически воздействует перегретый пар, находящийся в оболочке и являющийся энергоносителем, передающим кинетическую энергию струи воды. Под действием потока воды происходит движение паровой пленки, при этом на границе раздела «вода — пар» скорость движения равна скорости водяного потока, на границе раздела «пар — жидкий металл» скорость движения пленки можно принять равной нулю.

Для оценки минимального размера капли введем ряд допущений. Паровая пленка существует в течение всего времени деформации капли, флуктуационные явления, связанные со срывом паровой оболочки с поверхности капли, не происходят. Пленка находится в состоянии устойчивого равновесия, и давление пара в ней равно давлению воды в струе. Температура пара линейно изменяется от значения температуры капли T_p на границе раздела «пар — жидкий металл» до 373 К на внешней поверхности оболочки. Скорость потока воды, воздействующего на струю расплава, равна скорости истечения на срезе форсунок. Пар в оболочке является идеальным газом.

Скорость потока жидкости, которая движется из форсунки, зависит от давления P на срезе форсунки и плотности жидкости ρ_e [6, 7] $\omega = K\sqrt{2P/\rho_e}$. Значение коэффициента K определяется типом используемой форсунки.

Принимая во внимание введенные допущения и используя уравнение состояния идеального газа, можно определить эффективную плотность энергоносителя, которым является пар в оболочке:

$$\rho_s = \frac{2P\mu}{R(T_p + 373)}, \quad (1)$$

где T_p — абсолютная температура расплава, μ — молярная масса пара, R — универсальная газовая постоянная.

Учитывая зависимости скорости потока воды, эффективной плотности энергоносителя, получим для минимального диаметра делящейся капли

$$d_{\min} = \frac{\sigma We R \rho_s (T_p + 373)}{4K^2 \mu P^2}, \quad (2)$$

или, подставляя значения плотности воды $\rho_e = 1 \text{ т/м}^3$, молярной массы пара $\mu = 18 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$ и универсальной газовой постоянной $R = 8.31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$, —

$$d_{\min} = \frac{0.115 \cdot 10^6 \sigma (T_p + 373) We}{K^2 P^2}. \quad (3)$$

При изучении процессов диспергирования расплавов потоком жидкости принимается допущение, что струя металла первоначально распадается на отдельные пряди, имеющие форму цилиндра, длина которого в 10 раз больше его диаметра [1, 7]. Кроме того, капли, образующиеся после каждого акта дробления, также имеют форму цилиндра с указанным соотношением длины и диаметра. Исходя из равенства объемов пряди и образующейся из нее сферической капли, длина l исходной пряди и диаметр d сферической капли связаны: $d = 0.247l$. Подставляя это значение в (3) и учитывая численные значения критерия Вебера, получим выражения для минимальных значений длины пряди расплава, которая может разделиться на более мелкие по обычному механизму при первой критической скорости потока воды:

$$l_{\min} = \frac{1.07 \cdot 10^6 \sigma (T_p + 373)}{K^2 P^2}$$

и «взрывом» при второй критической скорости:

$$l_{\min} = \frac{1.86 \cdot 10^6 \sigma (T_p + 373)}{K^2 P^2}.$$

С использованием (4) и (5) выполнена оценка критической длины пряди расплавов легированной стали и меди при различных условиях распыления.

Зависимости критического значения длины пряди от давления воды при различных температурах расплава и двух возможных механизмах разрушения представлены на рис. 1. При расчете принято допущение, что температура пряди остается постоянной во время всех актов деления.

Анализ полученных зависимостей, а также (4) и (5), позволяет сделать следующие выводы. С увеличением давления воды в исследуемом диапазоне минимальная длина пряди расплава, которая может разделиться на две и более, уменьшается. Это объясняется тем, что для прядей с малым размером относительное увеличение поверхностной, энергии при дроблении больше, чем для крупных прядей, если количество образующихся новых капель в обоих случаях одинаково. Значит, величина энергии, которая должна быть передана струей воды мелкой капле, чтобы вызвать ее разрушение, больше, чем крупной.

Увеличение температуры расплава приводит к незначительному повышению критической длины пряди, как делящейся по обычному механизму, так и по взрывному. Такое влияние температур связано с одновременным протеканием двух явлений. Величина поверхностного натяжения расплава уменьшается, значит эффективность дробления повышается. Но вместе с этим с ростом температуры

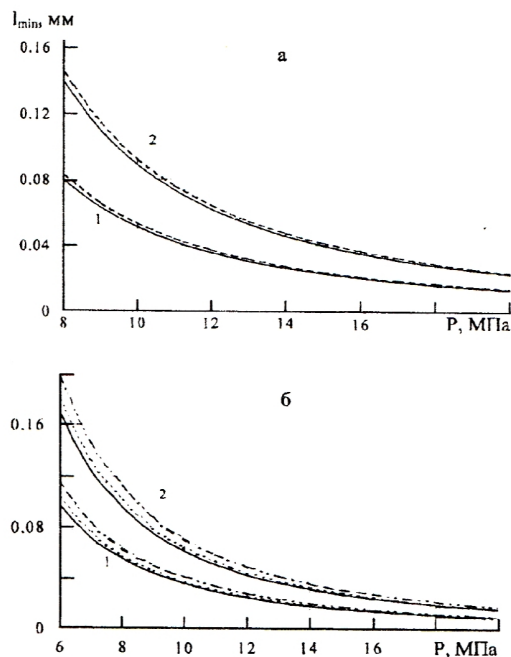


Рис. 1. Зависимости минимальной длины пряди, которая может разделиться, от давления воды при распылении расплава стали (а) и меди (б): 1 — дробление по обычному механизму (штриховая линия — температура расплава 1723 К, сплошная — 1923 К), 2 — по механизму взрыва (сплошная линия — 1473 К, пунктирная — 1573 К, штрих-пунктирная — 1773 К)

жидкой капли снижается эффективная плотность пара в оболочке (в соответствии с (1)) и воздействие энергоносителя на каплю.

При относительно малых значениях давления воды влияние величины скорости потока и температуры на критический размер более выражено, чем при высоких значениях.

Капли, имеющие малый размер, будут разрушаться в основном по обычному механизму с образованием 2–4 новых капель. Минимальная длина пряди, которая может разделиться на более мелкие по механизму взрыва, примерно в 1.7 раз больше, чем для пряди, делящейся по обычному механизму с образованием 2–4 новых капель. Для того чтобы мелкая капля разделилась по взрывному механизму, необходимо увеличение давления воды примерно в 1.3 раза при сохранении неизменной температуры расплава. Значит, «взрывное» дробление преимущественно будет реализовываться при делении капель больших размеров.

Эти результаты хорошо согласуются с оценкой значений суммарной поверхности вновь образующихся капель при дроблении исходной пряди по

первому и второму механизмам. Если принять, что при разрушении жидкой пряди по обычному механизму образуются в среднем три новые, одинакового размера, а по механизму взрыва — в среднем 15 новых прядей, то общая поверхностная энергия капель во втором случае выше, и для образования новых поверхностей необходимо воздействие высокоэнергетического потока воды, скорость которого в 1.14 раз больше.

Следует отметить, что ожидаемый минимальный размер пряди медного расплава примерно на 25 % меньше критического размера пряди стали в интервале температур, принятом для распыления рассматриваемых материалов. Значит, следует ожидать повышения дисперсности, увеличения содержания мелких фракций и уменьшения средних размеров частиц распыленного порошка меди по сравнению с порошком стали при одинаковых давлениях воды.

Очевидно, что при реальном распылении дробление капель расплава будет проходить по смешанному механизму. Соответственно значения критической длины пряди будут находиться в области, расположенной выше кривых, описывающих дробление по механизму деления на 2–4 новые пряди и механизму взрыва. Это обеспечит полифракционность получаемых порошков, что положительно скажется на их уплотняемости при прессовании и активности при спекании.

Учитывая особенности используемых технологий и установок распыления, а именно, наличие промежуточного приемного тигля для расплава, следует ожидать, что различные порции струи расплава будут диспергироваться при различных температурных условиях. Это является следствием охлаждения расплава в приемном тигле за время распыления одной плавки. Чем позже объем жидкого металла поступит в зону распыления, тем ниже его температура. В результате увеличивается значение минимального размера дробящейся капли, снижается эффективность диспергирования, уменьшается время пребывания капли в жидком состоянии, а значит и возможный временной интервал деформации и дробления капель, повышается содержание крупных частиц в получаемом порошке.

Использование пакетов прикладных программ математической обработки позволило получить графическую интерпретацию зависимости минимального размера делящейся капли распыляемого расплава от температурно-силовых параметров процесса с учетом изменения поверхностного натяжения металла, критической скорости потока энергоносителя, типа форсунки. В пределах реально используемых на практике температур расплавов и

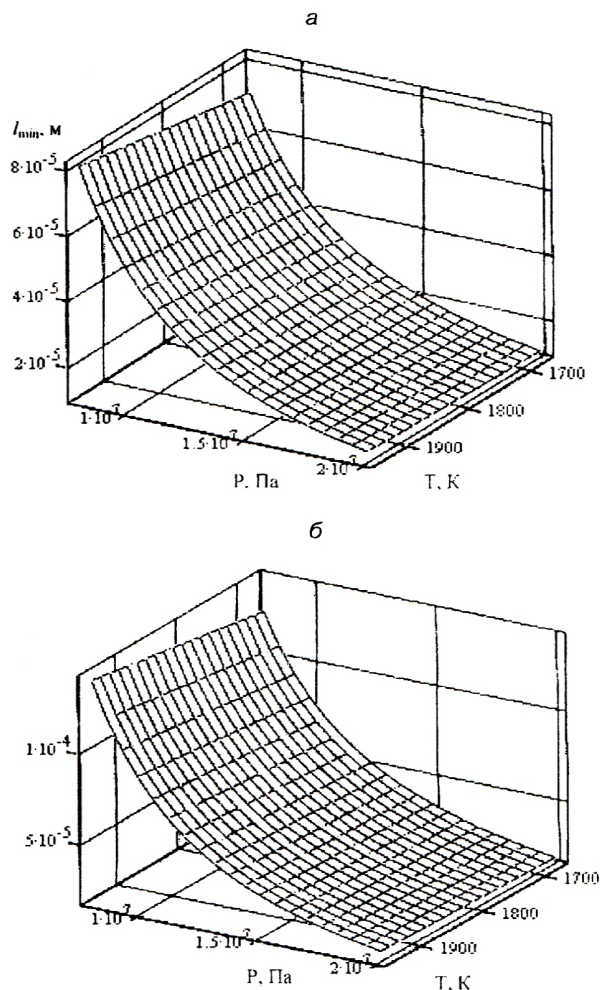


Рис. 2. Совместное влияние давления воды и температуры расплава на минимальный размер делящейся капли стали: а — обычный механизм дробления, б — дробление взрывом

давления воды зависимость для стали может быть проиллюстрирована гладкой поверхностью (рис. 2, $K = 0.82$).

Выводы. Таким образом, размер частиц металлических порошков, полученных распылением водой, зависит от того, каким механизмом контролируется распад струи расплава и дробление жидких капель-делением на 2–4 новых фрагмента (обычный механизм) или делением «взрывом» с образованием более 10–15 новых капель. Преобладание первого или второго механизмов определяется главным образом величиной давления струи воды. Полученные зависимости позволяют прогнозировать минимальный размер капли, которая может испытать акт деления при различных условиях распыления-давления воды и температуре расплава.

Гранулометрический состав распыленных порошков можно успешно регулировать изменением давления воды и температуры расплава. С целью получения порошков с узким распределением частиц по размерам восстановление температурно-силовых условий диспергирования при охлаждении расплава в процессе распыления может быть осуществлено путем использования нестационарных режимов с изменяющимся давлением воды.

1. Ничипоренко О. С., Найда Ю. И., Медведовский А. В. Распыленные металлические порошки. — Киев: Наук. думка, 1980.—240 с.
2. Ничипоренко О. С., Помосов А. В., Набойниченко С. С. Порошки меди и ее сплавов. — М.: Металлургия, 1988.—206 с.
3. Силаев А. Ф., Фишман Б. Д. Диспергирование жидких металлов и сплавов. — М.: Металлургия, 1983.—144 с.
4. Терновой Ю. Ф., Пашетнева Н. Н., Билан В. И., Кононенко А. А. Теоретические и экспериментальные исследования процесса газоструйного распыления струи расплава // XVII Всесоюз. конф. по порошковой металлургии: Тез. докл. — К.: ИПМ АН СССР.—1991.—С. 25.
5. Sanin A. F., Nitchiporenko O. S., Domoratsky V. A. Some peculiarities of water atomization of high speed steel melts // PM into the 1990's. — London: The Institute of Metals, 1990.—V. 3.—P. 1—4.
6. Киселев В. И. Насосы, компрессоры, вентиляторы. — М.: Металлургиздат, 1959.—315 с.
7. Санин А. Ф., Ничипоренко О. С. Влияние давления воды на форму частиц порошка при распылении. Ч. 1. Особенности теплообмена в факеле энергоносителя // Порошковая металлургия.—1988.—№ 9.—С. 1—5.