

УДК 669.35

© 2011 г. И. Э. Игнатьев<sup>1</sup>, Э. А. Пастухов, Е. В. Игнатьева,  
А. В. Долматов, В. П. Ченцов

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ВИБРООБРАБОТКИ РАСПЛАВОВ ПРИ НАЛИЧИИ АГЛОМЕРИРОВАННЫХ ПОРОШКОВЫХ ДОБАВОК

Описаны и в виде математических формул представлены условия погружения агломератов порошковых добавок в расплав и их разбиение в расплаве под воздействием низкочастотных колебаний.

*Ключевые слова:* расплавы, низкочастотная обработка, порошки, агломераты, смачиваемость.

В Институте металлургии УрО РАН на установке низкочастотной обработки расплавов получают различные композиционные сплавы [1]. При этом частицы добавляемых в расплав мелко- и высокодисперсных порошков нередко оказываются агломерированными в комки или брикеты. Замешивание агломератов в одних случаях приводит к неоднородности получаемого сплава и, следовательно, требует увеличения продолжительности и интенсивности виброобработки расплава, в других — наличие агломератов не является негативным фактором. Поэтому предварительное дробление агломерированных порошков может оказаться как необходимой дополнительной операцией, так и бесполезной, и нужен критерий необходимости дробления. Другая проблема — конструкционная особенность установки, позволяющая производить виброобработку только спустя некоторое время после засыпки порошковой композиционной добавки.

Рассмотрение эффективности низкочастотного воздействия на агломерат в расплаве на стадиях засыпки, погружения в расплав и виброобработки позволило бы выявить условия необходимости предварительного дробления порошковых агломератов и необходимость реконструкции установки.

### ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

**Влияние поверхностного натяжения расплава на погружение порошковых агломератов в расплав.** Порошковые частицы агломерируются как при их производстве, так и при хранении в результате слеживания и температурных колебаний. Агломерационная связь частиц может представлять собой как механическое сцепление частиц, так и их диффузионное соединение. При засыпке в расплав под влиянием температурного скачка существует вероятность перехода механического сцепления частиц в диффузионное.

Рассмотрим диффузионный контакт частиц как более прочный. Он характеризуется величиной шейки контакта, определяемой по закону Пинеса для твердофазного спекания [2]:

$$x^4 = \frac{4d\sigma_s b^3 \bar{D}t}{kT} \quad (1)$$

<sup>1</sup>igx2@mail.ru.

Здесь  $x$  – радиус шейки контакта двух частиц,  $d$  – диаметр спекаемых частиц,  $\sigma_T$  – поверхностное натяжение материала частиц,  $b$  – расстояние между соседними узлами в атомной решетке материала порошковых частиц,  $\bar{k}$  – постоянная Больцмана,  $\bar{D}$  – коэффициент диффузии,  $t$  – время диффузионного процесса,  $T$  – температура, выраженная в кельвинах.

Из уравнения (1) следует, что, хотя у крупных частиц за одно и то же время образуется шейка контакта несколько больше, чем у частиц с меньшим диаметром ( $x \sim d^{0.25}$ ), удельный размер шейки

$$x/d \sim d^{-0.75} \quad (2)$$

у мелких частиц значительно больше, что приводит к большему замыканию и изолированности пор агломерата как пористого тела. В результате при одинаковой массе добавки порошок с мелкими частицами погружается в расплав медленнее, чем с крупными, или не погружается вовсе.

Примем удельную плотность агломерата как  $\theta \approx 0.6$  [3] и рассмотрим условия затопления порошкового агломерата в расплаве. В первую очередь для погружения в расплав агломерату необходимо преодолеть поверхностное натяжение  $\sigma$  расплава, препятствующее затоплению в случае отрицательного смачивания (угол смачивания  $\vartheta \geq 90^\circ$ ). Для преодоления  $\sigma$  расплава одной шарообразной порошковой частицей диаметра  $d$  (считаем преодолением перемещение частицы на расстояние больше половины диаметра частицы) работа силы тяжести этой частицы должна быть больше работы сопротивления поверхностного натяжения [4] (адсорбцию газа частицами порошка не учитываем):

$$mg \frac{d}{2} = g\rho_T \pi \frac{d^4}{12} \geq -\frac{1}{2} \sigma \cos \vartheta \cdot \pi \frac{d^2}{4} \quad (3)$$

или

$$d \geq \sqrt{-\frac{1.5\sigma \cos \vartheta}{g\rho_T}}, \quad (4)$$

где  $mg$  – вес частицы,  $\rho_T$  – плотность материала частицы.

Поскольку порошок засыпают не по отдельным частицам, а массой, то он распределяется по поверхности расплава в  $\bar{c}$  слоев. Условие (4) должно перейти в условие

$$d \geq \sqrt{-\frac{1.5\sigma \cos \vartheta}{g\rho_T \bar{c}}} \quad (5)$$

или

$$\bar{c} \geq -\frac{1.5\sigma \cos \vartheta}{g\rho_T d^2}. \quad (6)$$

Выполнение (6) приводит к затоплению всей порошковой насыпки, если частицы не агломерированы. Если частицы ассоциированы в шаровидный агломерат диаметра  $D$ , то условие (4) примет вид

$$D \geq \sqrt{-\frac{1.5\sigma \cos \vartheta}{g\rho_T \theta}}, \quad (7)$$

а условие (6) перейдет в выражение

$$\bar{c} \geq -\frac{1.5\sigma \cos \vartheta}{g\rho_T D^2 \theta}. \quad (8)$$

Например, для частиц порошка карбида кремния SiC ( $\rho_T = 3200 \text{ кг/м}^3$ ) в алюминиевом расплаве при  $900^\circ\text{C}$  ( $\sigma = 0.454 \text{ Н/м}$ ,  $\cos\vartheta = -0.72$ ) условие (4) запишется как  $d \geq 3.9 \text{ мм}$ , что является размером уже не порошка, а дроби, а по условию (7) имеем  $D \geq 5.1 \text{ мм}$ . Очевидно, что в соответствии с выражениями (6) и (7) требуется значительное количество слоев порошка SiC для преодоления поверхностного натяжения жидкого алюминия.

Включение в работу на этой стадии низкочастотного воздействия преодолевает  $\sigma$  в результате возмущения поверхности расплава. Поэтому при низкочастотной виброобработке расплава поверхностное натяжение для окунающего порошкового агломерата в расплаве не существенно, но в отсутствие таковой обработки может представлять проблему.

Следующим препятствием к затоплению агломерата может оказаться соотношение плотностей агломерата  $\rho_T\theta$  и расплава  $\rho_{ж}$ .

#### Влияние разности плотностей и угла смачивания на погружение агломератов в расплав.

Очевидно, что при плотности агломерата большей плотности расплава  $\rho' = \theta\rho_T \geq \rho_{ж}$  агломерат утонет, а при плотности материала порошковых частиц меньшей плотности расплава  $\rho_T < \rho_{ж}$  агломерат останется на поверхности. При соотношении  $\rho_T\theta < \rho_{ж} < \rho_T$  для определения условий его затопления следует определить осадку конгломерата в расплаве, зависящую от текущего значения угла смачивания.

Агломерат представляет собой пористое тело, поры которого, ввиду малых размеров, можно рассматривать как капилляры. Для вычисления его осадки в расплаве необходимо определить высоту подъема расплава в агломерате под действием капиллярных сил. Эту высоту выражают [4] формулой

$$H = -\frac{2\sigma \cos\vartheta}{(\rho_{ж} - \rho_{газ})rg} \approx -\frac{2\sigma \cos\vartheta}{\rho_{ж}rg}, \quad (9)$$

где  $r$  — радиус капилляра, который определяется, согласно работе [7], как  $r \approx 0.38d$  (вытекает из формулы средней площади поры в агломерате  $S_T = 0.454d^2$ ). Тогда выражение (9) примет вид

$$H = -5.263 \frac{\sigma \cos\vartheta}{\rho_{ж}dg}. \quad (10)$$

Величину осадки  $\bar{H}$  шаровидного агломерата в расплаве найдем из следующих двух уравнений. Для осадки меньшей, чем радиус агломерата  $\bar{H} < D/2$ , имеем выражение вида

$$\frac{\pi}{6} D^3 \theta \rho_T g = \pi \bar{H}^2 \left( \frac{D}{2} - \frac{\bar{H}}{3} \right) \rho_{ж} g - \pi (\bar{H} + H)^2 \left( \frac{D}{2} - \frac{\bar{H} + H}{3} \right) \theta \rho_{ж} g, \quad (11)$$

где левая часть уравнения — вес агломерата, правая — архимедова сила с учетом частичного заполнения пор агломерата расплавом.

Для осадки большей, чем радиус агломерата  $\bar{H} > D/2$ , из тех же соображений имеем

$$\frac{\pi}{6} D^3 \theta \rho_T g = \pi \left( \frac{D^3}{6} - (D - \bar{H})^2 \left( \frac{D}{2} - \frac{D - \bar{H}}{3} \right) \right) \rho_{ж} g - \pi (\bar{H} + H)^2 \left( \frac{D}{2} - \frac{\bar{H} + H}{3} \right) \theta \rho_{ж} g. \quad (12)$$

Агломерат утонет, если при решении уравнения (12) получим  $\bar{H} \geq D$ .

Если агломерат представляет собой брикет из частиц диаметра  $d$ , ассоциированных в  $\bar{c}$  слоев по высоте, то выражения (11) и (12) сведутся к одному уравнению

$$\bar{H} = \frac{\pi D_1}{6 \rho_*} d \theta^{\frac{2}{3}} \bar{c} + H \quad (13)$$

с условием затопления  $\bar{H} \geq d\bar{c}$ .

В выражения (11)–(13) входит величина  $H$ , зависящая от угла смачивания. Т.е. для погружения конгломерата в расплав фактор смачивания очень важен.

Угол смачивания является функцией температуры (если пренебречь влиянием газовой среды), и осадка агломерата в расплаве меняется вместе с изменением угла смачивания. В отсутствие экспериментальных данных по изменению смачивания в инкубационный период можно с некоторой долей погрешности воспользоваться следующей схемой.

Обычно известно время  $\bar{T}$ , принимаемое за инкубационный период, через которое фиксируются точки зависимости  $\bar{\vartheta} = F(T)$ . Считаем, что в начальный момент касания агломератом расплава смачивание полностью отсутствует и  $\vartheta = 180^\circ$ , а в дальнейшем в течение инкубационного периода угол смачивания убывает по линейному закону как функция времени  $t$ , выраженная в секундах:

$$\vartheta = 180^\circ - f(T)t. \quad (14)$$

В момент окончания инкубационного периода получаем

$$\bar{\vartheta} = 180^\circ - f(T)\bar{T} = F(T), \quad (15)$$

где  $F(T)$  выражено в градусах и откуда  $f(T)$  определяется как модуль скорости изменения угла смачивания

$$f(T) = \frac{180^\circ - F(T)}{\bar{T}}. \quad (16)$$

Тогда угол смачивания в любой момент инкубационного периода равен

$$\vartheta = 180^\circ - \frac{180^\circ - F(T)}{\bar{T}}t. \quad (17)$$

Подставляя выражение (17) в (10) и (12) при  $\bar{H} = D$  и решая (12) относительно  $t$ , получаем примерное время затопления шаровидного агломерата в расплаве (для агломерата в виде параллелепипеда – уравнение (13)). Это время должно быть, по крайней мере, вдвое меньше времени обработки расплава, чтобы не снижать эффективность данного метода получения композита.

Например, аппроксимируя экспериментальные данные работы [5] по смачиванию подложек SiC алюминиевым расплавом после 5-минутной выдержки, зависимость  $\bar{\vartheta} = F(T)$  установившегося угла смачивания  $\bar{\vartheta}$  от температуры  $T$  можно записать в виде

$$\bar{\vartheta} = \frac{150.3^\circ - 0.0864T}{1 - 0.00054T}. \quad (18)$$

Здесь температура  $T$  – в кельвинах, коэффициент при  $T$  в числителе имеет размерность углового градуса, деленного на кельвин, коэффициент при  $T$  в знаменателе имеет размерность единицы, деленной на кельвин, а полученное значение угла  $\bar{\vartheta}$  вы-

ражается в градусах. Тогда угол смачивания в инкубационный период определится по уравнению (17) как

$$\vartheta = 180^\circ - \frac{180^\circ - \bar{\vartheta}}{3000} t, \quad (19)$$

где знаменатель – время инкубационного периода в секундах.

Из выражений (18) и (19) следует, что несмачивание ( $\vartheta \geq 90^\circ$ ) переходит в смачивание при  $T \approx 1600$  К, т.е. при значительном перегреве алюминиевого расплава. При температуре ниже  $T \approx 1600$  К решение уравнения (12) всегда будет отвечать соотношению  $\bar{H} < D$ , и агломерат SiC на этом температурном диапазоне сам в расплаве не утонет ни в инкубационный период, ни после его истечения, что подтверждается экспериментом [6].

Пути, ведущими к затоплению агломерата SiC в алюминиевый расплав через снижение угла смачивания, могут быть повышение температуры, введение дополнительных химических реагентов, увеличение интенсивности виброобработки [6]. Но каждый из этих подходов сложнее, чем предварительный размол агломерированного порошка до отдельных частиц с засыпкой в расплав при режиме виброобработки.

Рассмотрим также гипотетический случай. Допустим, до наступления смачивания, требующего времени в соответствии с выражением (15), порошок, лежащий на поверхности расплава, вследствие нагрева начинает спекаться. Твердофазное спекание частиц между собой описывается формулой (1). Увеличение площадей межчастичных контактов, сопровождаемое усадкой агломерата, в некоторый момент  $\hat{t}$  приводит к замыканию пор, превращая агломерат в поплавок. Разрешая уравнение (1) относительно удельной площади контакта  $\hat{s} = 4x^2/d^2$  и времени  $\hat{t}$ , получаем

$$\hat{t} = \hat{s}^2 \frac{\bar{k} T d^3}{64 \sigma_T b^3 \bar{D}}. \quad (20)$$

Коэффициент диффузии  $\bar{D}$  представляется через известную [2] формулу Аррениуса  $\bar{D} = D_0 \exp(-e_a/\bar{k}T)$ . Поверхностное натяжение  $\sigma_T$  частицы при твердофазном спекании можно найти, считая ее квазижидкой. Размер удельной площадки контакта  $\hat{s}$ , соответствующий замыканию пор, вычисляется из геометрических соображений.

Изоляция пор произойдет при  $\hat{s} \approx 1$ . В качестве гипотетического порошка примем железный порошок при  $T = 1400$  К,  $\sigma_T = 1.82$  Н/м, энергии активации  $e_a = 39 \cdot 10^{-20}$  Дж/атом, модуле коэффициента диффузии  $D_0 = 5.8 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с [2]. Из выражения (20) в случае диаметра частиц  $d = 10^{-3}$  м = 1 мм получаем время замыкания пор  $\hat{t} \approx 150$  с = 2.5 мин. В случае размера  $d = 10^{-5}$  м = 1 мкм будем иметь  $\hat{t} \approx 1.5 \cdot 10^{-4}$  с.

Уменьшение размера частиц на один порядок приводит к сокращению времени их спекания в агломерат на три порядка. В данном случае при замешивании с одновременной виброобработкой расплава миллиметровых частиц порошка время спекания этих частиц больше вибрационного периода  $\hat{t} \gg \mu^{-1}$ , где рабочий диапазон частот колебаний  $\mu = 16-100$  Гц, и, следовательно, агломерации не произойдет вследствие вовлечения частиц в поток. Но для частиц микронных размеров ситуация обратная:  $\mu^{-1} \gg \hat{t}$ , и поэтому агломерация в виде спекания с изоляцией пор будет препятствовать затоплению, если  $\rho_T \theta < \rho_{ж}$ .

Те. в этом гипотетическом случае тоже важно, чтобы засыпка порошка в расплав происходила при рабочем режиме виброобработки. Эффективность виброобработки расплава будет зависеть от размера частиц порошка добавки.

Если условие  $\bar{H} \geq D$  при решении уравнения (12) (или условие  $\bar{H} \geq d\bar{c}$  при решении уравнения (13)) выполнено, то агломерат должен погрузиться в расплав. Не затрагивая вопросов растворимости, сравним возможность механического разъединения агломерата на частицы при простом погружении в расплав и при низкочастотной обработке.

**Условия разбиения агломератов при их погружении в расплав.** При простом погружении наибольшее воздействие на агломерат со стороны расплава оказывается тогда, когда агломерат представляет собой пористый порошок массив, занимающий всю площадь поперечного сечения тигля. Рассмотрим именно такой случай максимального возможного воздействия.

Ввиду пористости агломерата, расплав под давлением просачивается по порам, оmyвая потоком все частицы порошкового слоя. Исходя из равенства давления в расплаве как жидкости по всем направлениям, будем считать, что на каждую частицу верхнего слоя порошкового массива действует давление, равное весу или давлению самой этой частицы, умноженному на количество слоев вдоль толщины порошковой массы. (Поэтому в отсутствие упруговязкой связи между частицами порошок очень быстро полойно “распущается” [7]). При толщине слоя  $h$  порошковая масса оказывает давление на подушку расплава, равное  $p = hg(\rho_r - \rho_j)$ .

Расплав просачивается через поры порошкового массива со скоростью  $v_c$  реализуя избыточное давление и оказывая сопротивление погружению каждой частицы порошка силой  $F_2 = 3\pi\eta d v_c$  (формула Стокса). Если принять расплав несжимаемым, то скорость изменения объема жидкостной подушки будет равняться его расходу через поры. При относительной плотности порошковой постели  $\theta \approx 0.6$  скорость просачивания и скорость погружения порошковой массы в среде расплава связаны условием  $v_c = \dot{y}/(1 - \theta^{0.67})$ . Принимая за  $S$  площадь горизонтального сечения тигля, массу порошка можно выразить в виде  $hS\rho_r\theta$ , количество частиц порошка как  $6hS\theta/(\pi d^3)$ , вес порошка в жидкости в виде  $hS\theta(\rho_r - \rho_j)g$ . Тогда уравнение погружения порошковой массы (ось  $Oy$  направим в сторону падения) запишется:

$$\ddot{y} = \left(1 - \frac{\rho_j}{\rho_r}\right)g - \frac{18\eta \cdot \dot{y}}{\rho_r d^2 (1 - \theta^{0.67})} = M - N\dot{y}. \quad (21)$$

В начальный момент падения  $t = 0$  скорость равна нулю  $\dot{y}(0) = 0$ , отсюда – решение относительно скорости падения:

$$\dot{y} = \frac{M}{N} (1 - e^{-Nt}). \quad (22)$$

На каждую частицу порошковой массы действует возрастающая по времени сила

$$F_2 = 3\pi\eta d \frac{M(1 - \exp(-Nt))}{N(1 - \theta^{0.67})}. \quad (23)$$

Частицы верхнего яруса порошкового массива связаны только с частицами нижележащего слоя. Если принять равномерное распределение частиц в массиве [3], то каждая частица верхнего яруса опирается на три, лежащих ярусом ниже, с косинусом угла наклона к направлению действия силы  $F_2$ , равным примерно  $\cos\alpha = 0.67$ . Усилие связи частиц  $F_3$  можно оценить по значению предела прочности для материала частицы  $B$ , выра-

жаемого в паскалях, и радиусу шейки контакта между частицами  $r$  как  $F_3 = \pi B r^2$ . Отрыв верхнего яруса от остальной порошковой массы произойдет при условии

$$F_2 > 3F_3 \cos \alpha \quad (24)$$

или

$$r < \left( \frac{Md\eta(1 - \exp(-Nt))}{N(1 - \theta^{0.67})B \cos \alpha} \right)^{0.5} \quad (25)$$

Поскольку по этой же схеме осуществляется последовательный отрыв других ярусов, неравенство (25) можно принять в качестве критерия разрушения порошкового массива.

Допустим, в расплав с плотностью  $\rho_{\text{ж}} = 2700 \text{ кг/м}^3$  и динамической вязкостью  $\eta \approx 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$  без химического взаимодействия погружается агломерированный порошок с характеристиками  $\rho_{\text{т}} = 7800 \text{ кг/м}^3$ ,  $B = 4.8 \cdot 10^8 \text{ Па}$ ,  $d = 10^{-3} \text{ м}$ . Согласно (22), за 1 с скорость погружения порошковой массы возрастает от нуля до  $\dot{y} = 1.17 \text{ м/с}$ . По критерию (25) радиус шейки контакта частиц, который можно разорвать данным способом за секунду, отвечает неравенству  $r < 0.61 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 61 \text{ нм}$ .

Теперь рассмотрим случай минимального воздействия на агломерат (чем меньше частиц в агломерате, тем меньше его парусность и поэтому воздействие на него слабее) при самом малоэффективном режиме обработки расплава — колебаниях тигля вдоль направления силы тяжести без использования поршня. Составим уравнение движения агломерата как для одиночной частицы размера  $d$ .

Уравнение движения такой частицы в рабочем режиме запишется в виде

$$\ddot{y} = A\omega^2 \sin \omega t + \left(1 - \frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{т}}}\right)g - \frac{3k\rho_{\text{ж}}(A\omega \cos \omega t)^2}{4d\rho_{\text{т}}} + \frac{18\eta\dot{y}}{d^2\rho_{\text{т}}(1 - \theta^{0.67})}, \quad (26)$$

где первое слагаемое — сила инерции частицы относительно неподвижной системы координат, второе слагаемое правой части уравнения — вес частицы в расплаве, третье — звуковое давление на частицу, четвертое — сопротивление среды движению частицы. Принимая параметры колебаний тигля  $A = 0.0075 \text{ м}$ ,  $\mu = 28 \text{ Гц}$ , коэффициент  $k = 0.1$  (соответствует звуковому давлению в данном режиме на отдельную шарообразную частицу) и решая уравнение (26), получаем, что скорость колебаний агломерата изменяется в диапазоне от  $\dot{y} = -1.3 \text{ м/с}$  до  $\dot{y} = 1.5 \text{ м/с}$  (см. рисунок). Если агломерат состоит из двух частиц, то усилия разрыва шейки контакта требуются наибольшие тогда, когда ось, соединяющая центры частиц, совпадает по направлению со скоростью агломерата и силой сопротивления  $F_2$ . Неравенство, аналогичное (24), в этом случае принимает вид

$$r < (3d\eta \cdot \dot{y}/B)^{0.5} \quad (27)$$

Из (27) следует, что с уменьшением размера частиц агломерата эффективность его разбиения снижается, и это нужно учитывать. Подставляя в (27) значение скорости  $\dot{y} = 1.5 \text{ м/с}$ , находим  $r < 94 \text{ нм}$ . Т.е. радиус разрыва шейки контакта частиц агломерата в 1.5 раза больше, чем в варианте простого погружения.

При простом затоплении было рассмотрено максимальное из возможных воздействие на агломерат, скорость которого монотонно росла от 0 до 1.17 м/с, в случае же вибрации тигля — минимальное из возможных, причем скорость изменялась в диапазоне от  $-1.3$  до 1.5 м/с за секунду 56 раз (поскольку  $\mu = 28 \text{ Гц}$ ). Напряжения в шейке контакта частиц агломерата пропорциональны скорости, и, значит, тоже цикличны и знакопере-

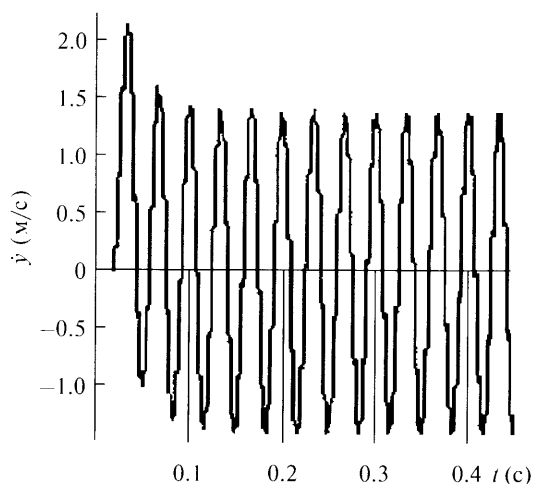


График скорости  $\dot{y}$  движения порошковой частицы железа диаметром 1 мм относительно дна стакана с расплавом алюминия во время  $t$  виброобработки с амплитудой  $A = 0.0075$  м и частотой  $\mu = 28$  Гц.

менны, что многократно быстрее приводит к разрушению, чем, например, в случае периодического сжатия – снятия нагрузки [8]. Таким образом, даже не создающая в расплаве высокоскоростных турбулентных потоков низкочастотная обработка посредством колебаний тигля в отсутствие поршня эффективна как способ разбиения агломератов порошковых добавок. Степень ее эффективности можно оценивать по значениям скорости движения агломерата в расплаве, получаемым из решения уравнения (26), и по радиусам шейки контакта между частицами агломерата, определяемым по неравенству (27). Тем более эффективной должна оказаться создающая турбулентные потоки виброобработка колебаниями тигля при наличии неподвижного поршня, что является сутью предлагаемой реконструкции существующей установки.

#### ВЫВОДЫ

С точки зрения механики процесса (без учета химического аспекта виброобработки композиционного расплава), предварительное дробление порошковых агломератов как дополнительная операция востребовано лишь в случаях, когда для соотношения плотностей агломерата, расплава и материала порошка выполнено условие  $\rho_t \theta < \rho_{\text{ж}} < \rho_t$  (следует из выражений (9)–(20)).

Натяжение  $\sigma$  расплава может стать препятствием к погружению порошка только в отсутствие возмущения поверхности расплава. При низкочастотной обработке расплава поверхностное натяжение погружению порошка в расплав не препятствует (следует из выражений (2)–(8)).

Низкочастотная обработка композиционных расплавов высокоэффективна при разбиении порошковых агломератов. Эффективность разбиения снижается с уменьшением размера порошковых частиц, составляющих агломерат (следует из выражений (21)–(27)).

Из анализа приведенных выше формул следует, что для разбиения порошковых агломератов в композиционном расплаве виброобработку расплава нужно проводить с момента засыпки порошковой добавки, для чего требуется внести изменения в конструкцию виброустановки.

Работа выполнена при финансовой поддержке интеграционного проекта фундаментальных исследований УрО и СО РАН.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Игнатъев И.Э., Киселев А.В., Долматов А.В. и др. Математическое моделирование движения жидкости в цилиндре, возбуждаемое поршнем-вибратором. – Расплавы, 2005, № 6, с. 3–11.
2. Герцрикен С.Д., Дехтяр И.Я. Диффузия в металлах и сплавах в твердой фазе. – М.: ГИФМЛ, 1960. – 564 с.
3. Концевой Ю.В., Игнатъев И.Э., Игнатъева Е.В., Пастухов Э.А. Методика расчета энергосиловых и кинематических параметров очага деформации при прокатке многослойных систем с дисперсным слоем. – Изв. вузов, Цветная металлургия, 2009, № 3, с. 39–44.
4. Григорьев В.А., Зорин В.М. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 560 с.
5. Попова Э.А., Бодрова Л.Е., Ченцов В.П. и др. Изучение процессов смачивания карбида кремния алюминиевыми расплавами – Расплавы, 2008, № 3, с. 10–12.
6. Пастухов Э.А. Обработка низкочастотными акустическими колебаниями алюминиевых расплавов с целью модифицирования структуры литого металла и получения литых композиционных материалов. – В кн.: Физическая химия и технология в металлургии. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005, с. 70–76.
7. Концевой Ю.В., Пастухов Э.А., Игнатъев И.Э. и др. Виброаэрационное смешивание порошков в газовой среде. Сообщение 2. – Изв. вузов, Порошковая металлургия и функциональные покрытия, 2009, № 2, с. 6–10.
8. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.

Институт металлургии  
УрО РАН Екатеринбург

Поступила в редакцию  
3 августа 2010 г.