

развитие полигонизации наблюдается при меньших скоростях деформации.

В результате проведенных исследований оптимизированы технологические режимы получения горячештампованной стали ПК Г13. Наибольшие значения σ_b , δ , КС и износостойкости стали обеспечивают следующие технологические параметры ГШ: $t_{ГШ} = 1180 \div 1200$ °С, $\varepsilon = 25 \div 30$ %, $\dot{\varepsilon} = 10$ с⁻¹.

УДК 66.011 + 621.926

ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУТЕРОВКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕЛЬНИЦЫ ПРИ ИЗМЕЛЬЧЕНИИ

© 2013 г. **О. В. Лапшин, Н. Г. Касацкий, В. К. Смоляков**

Отдел структурной макрокинетики Томского научного центра (ТНЦ) СО РАН

О. В. Лапшин – докт. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. отдела структурной макрокинетики ТНЦ СО РАН (634021, г. Томск, пр. Академический, 10/3). Тел.: (3822) 49-22-94. E-mail: ovlap@mail.ru.

В. К. Смоляков – докт. физ.-мат. наук, зав. лабораторией этого отдела. E-mail: vsmol52@mail.ru.

Н. Г. Касацкий – ст. науч. сотр. этого отдела. Тел.: (3822) 49-22-94. E-mail: maks@fisman.tomsk.ru.

Построена математическая модель самофутеровки внутренней поверхности мельницы и мелющих тел в условиях механической обработки двухкомпонентной смеси. Определена динамика процесса. Найдены оптимальные режимы, позволяющие достигать заданной степени измельчения смеси при минимальных потерях вещества на самофутеровку. Основные выводы теоретического анализа подтверждены экспериментально.

Ключевые слова: измельчение, порошковая смесь, футеровка.

A mathematical model of self-lining of the internal surface of a mill and grinding bodies under the conditions of mechanical processing of two-component mixture has been constructed. The process dynamics is ascertained. The optimum modes allowing us to reach the prescribed degree of size reduction of the mixture are found with minimum losses of substance to self-lining. The main conclusions of the theoretical analysis are confirmed experimentally.

Key words: size reduction, powder mixture, lining.

ВВЕДЕНИЕ

Одна из проблем эффективного использования высокоэнергетического измельчительного оборудования связана с налипанием измельчаемого материала на внутреннюю поверхность барабана мельницы и мелющие тела. Этот процесс может привести к тому, что значительная часть измельченного материала будет находиться в образовавшихся на рабочих поверхностях слоях. Такая своеобразная самофутеровка снижает производительность измельчительного оборудования, создает дополнительные технологические трудности при извлечении вещества и очистке рабочих поверхностей. В то же время в некоторых случаях самофутеровка измельчаемым материалом рассматривается как положительное явление, уменьшающее намот вещества со стенок

ЛИТЕРАТУРА

1. Дорофеев Ю. Г. Динамическое горячее прессование пористых порошковых заготовок. М.: Металлургия, 1977.
2. Горелик С. С. Рекристаллизация металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1978.
3. Хониомб Р. Пластическая деформация металлов. М.: Мир, 1972.
4. Бернштейн М. Л. Структура деформированных металлов. М.: Металлургия, 1977.

мельницы и мелющих тел и позволяющее избежать преждевременного износа рабочих поверхностей и загрязнения порошковой смеси.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ПРИБЛИЖЕННЫЙ АНАЛИЗ

Рассматривается измельчение смеси веществ А и В в энергонапряженной мельнице. По мере механической обработки (МО) происходит дробление компонентов смеси, а также футеровка ими рабочих поверхностей мельницы. Предполагается, что компоненты А и В не вступают в химическое взаимодействие, но могут образовывать агломераты АВ.

Используя допущение о независимости измельчения компонентов смеси друг от друга [1], динами-

ку изменения удельной поверхности измельчаемых в мельнице частиц и агломератов можно представить в виде [2, 3]

$$\begin{aligned}\frac{ds_A}{dt} &= \left(1 - \frac{s_A}{s_{mA}}\right)k_A, \\ \frac{ds_B}{dt} &= \left(1 - \frac{s_B}{s_{mB}}\right)k_B, \\ \frac{ds_{AB}}{dt} &= (s_{mAB} - s_{AB})\frac{k_{AB}}{s_{mAB}} + \left[\frac{s_A s_B V_A V_B (\lambda V_A + V_B)}{V_{AB}(s_A V_B + \lambda s_B V_A)} - \frac{s_{AB}(V_A + V_B)}{3}\right]\frac{q}{V},\end{aligned}\quad (1)$$

где s_i , s_{mi} – текущая и максимально достижимая величина удельной поверхности частиц i -го вещества (здесь и в дальнейшем $i = A, B, AB$); $k_i = k_i W/V$ – размерный коэффициент, характеризующий затраты мощности мельницы на измельчение; W – мощность мельницы; V – текущий объем смеси; k_i – коэффициент пропорциональности; t – время; λ – коэффициент, учитывающий различие реологических свойств компонентов A и B ; $q = q'W/V$ – константа скорости агломерации; q' – коэффициент, зависящий от физико-химических свойств участвующих в агломерации компонентов; V_i – текущий объем в смеси i -го компонента. Радиусы частиц связаны с их удельными поверхностями соотношениями $r_i = 3/s_i$.

Считаем, что скорость налипания частиц i -го компонента на стенки мельницы и мелющие тела пропорциональна количеству его частиц (N_i) в камере, величине ее внутренней поверхности (S_Σ), включающей поверхность мелющих тел, и обратно пропорциональна ее внутреннему объему (V_Σ), не занятому мелющими телами. На основе этих положений запишем

$$\frac{dN_{\Phi i}}{dt} = \frac{S_\Sigma}{V_\Sigma} N_i K_{\Phi i}, \quad (2)$$

где $S_\Sigma = S_6 + n_m S_m$; S_6 – площадь внутренней поверхности барабана; S_m – площадь поверхности мелющего тела; n_m – количество мелющих тел; $V_\Sigma = V_k - n_m V_m$; V_k – внутренний объем мельницы; V_m – объем мелющего тела; $K_{\Phi i}$ – константа скорости футеровки компонентом i .

Умножив левую и правую части (2) на $4/3\pi r_i^3$, можно записать для скорости футеровки i -м компонентом следующее уравнение:

$$dV_{\Phi i}/dt = \Omega K_{\Phi i} V_i, \quad (3)$$

где $\Omega = S_\Sigma/V_\Sigma$; $V_{\Phi i}$ – объем компонента i , принявшего участие в футеровке.

Общий объем измельчаемой смеси и объемы ее компонентов определяются равенствами

$$\begin{aligned}V &= V_0 - \sum_i V_{\Phi i}, \quad V_A = V_{0A} - V_{\Phi A}, \quad V_B = V_{0B} - V_{\Phi B}, \\ V_{AB} &= V_0 - V_A - V_B - V_{\Phi AB},\end{aligned}\quad (4)$$

где $V_0 = V_{0A} + V_{0B}$; V_{0A} , V_{0B} – исходные объемы компонентов A и B .

Рассмотрим случай, когда измельчение частиц исходных компонентов смеси происходит без образования агломератов.

Подставив равенство $V_i = V_{0i} + V_{\Phi i}$ в (3) и проинтегрировав его, получим следующую зависимость:

$$V_{\Phi i} = V_{0i} [1 - \exp(-\Omega K_{\Phi i} t)], \quad i = A, B. \quad (5)$$

В свою очередь, для величины V_i можно записать

$$V_i = V_{0i} \exp(-\Omega K_{\Phi i} t). \quad (6)$$

Так как общий объем измельчаемой смеси составляет

$$V = V_0 - \sum_i V_{0i} [1 - \exp(-\Omega K_{\Phi i} t)] = \sum_i V_{0i} \exp(-\Omega K_{\Phi i} t),$$

то, подставив это равенство в уравнения (1) и проинтегрировав, в конечном итоге получим

$$s_i = s_{mi} \left[1 - \exp \left\{ -\frac{k_i' W}{s_{mi}} \int_0^t \frac{dt}{\sum_i V_{0i} e^{-\Omega K_{\Phi i} t}} \right\} \right]. \quad (7)$$

Интеграл в (7) берется только в случае равенства величин $K_{\Phi i}$ друг другу. Поэтому при $K_{\Phi i} \approx K_\Phi$ зависимость (7) можно представить в виде

$$s_i = s_{mi} \left[1 - \exp \left\{ -\frac{k_i' W}{s_{mi} V_0 \Omega K_\Phi} [\exp(\Omega K_\Phi t) - 1] \right\} \right]. \quad (8)$$

Перепишем зависимости (3)–(8) для относительных объемов компонентов смеси. Тогда, введя новые обозначения: $\mu_{\Phi i} = V_{\Phi i}/V_0$, в случае образования агломератов имеем

$$d\mu_{\Phi i}/dt = \Omega K_{\Phi i} \mu_i, \quad (9)$$

$$\begin{aligned}\mu &= \mu_0 - \sum_i \mu_{\Phi i}, \quad \mu_A = \mu_{0A} - \mu_{\Phi A}, \quad \mu_B = \mu_{0B} - \mu_{\Phi B}, \\ \mu_{AB} &= 1 - \mu_A - \mu_B - \mu_{\Phi AB}.\end{aligned}\quad (10)$$

Если измельчение порошковой смеси происходит без образования агломератов, то для относительных объемов компонентов можно записать:

$$\mu_{\Phi i} = \mu_{0i} [1 - \exp(-\Omega K_{\Phi i} t)], \quad i = A, B. \quad (11)$$

$$\mu_i = \mu_{0i} \exp(-\Omega K_{\Phi i} t). \quad (12)$$

В случае измельчения однокомпонентной смеси процесс футеровки описывается формулами (5), (6), (8) при $K_{\Phi i} = K_\Phi$.

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Численные расчеты проводились по схеме Эйлера с переменным шагом по времени. Предполагалось, что в процессе измельчения двухкомпонентной смеси агломераты не образуются. На рис. 1 представлена динамика измельчения двухкомпонентной смеси и футеровки стенок камеры и мелющих тел ее частицами. Видно, что с увеличением времени механообработки объем принявшего участие в футеровке материала становится больше (штриховые кривые на рис. 1, а), доля оставшихся в смеси частиц компонентов меньше (сплошные кривые на рис. 1, а), а удельная поверхность частиц растет (рис. 1, б). Причем пластичный компонент измельчается и принимает участие в процессе футеровки более интенсивно, чем твердый.

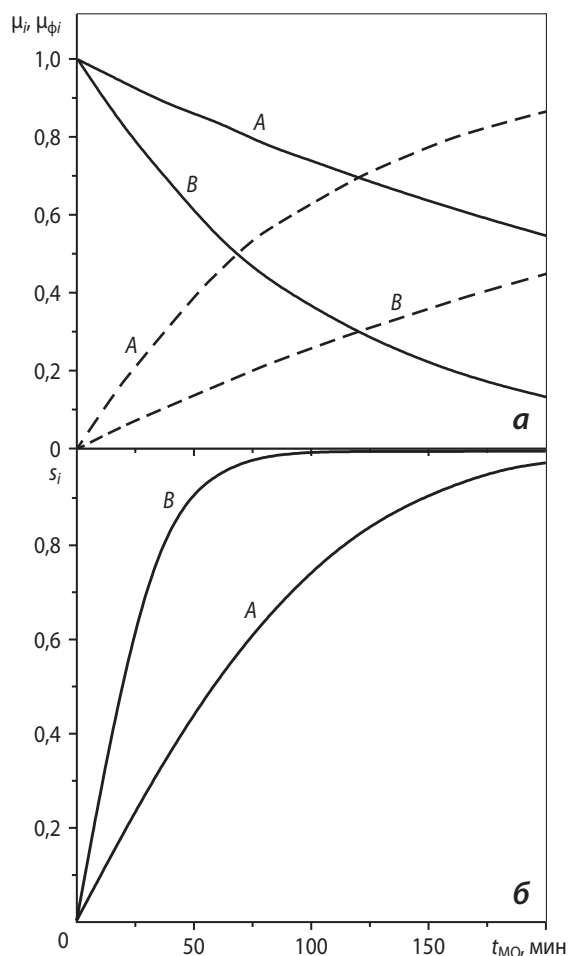


Рис. 1. Изменение объемных долей (а) и удельной поверхности (б) частиц компонентов А и В в процессе измельчения и футеровки
 $\Omega K_{\phi A} = 0,003 \text{ мин}^{-1}$, $\Omega K_{\phi B} = 0,01 \text{ мин}^{-1}$, $k_A = 0,01 \text{ м}^2/\text{мин}$, $k_B = 0,05 \text{ м}^2/\text{мин}$
 Штриховые кривые отражают динамику долей участвующих в футеровке веществ А и В

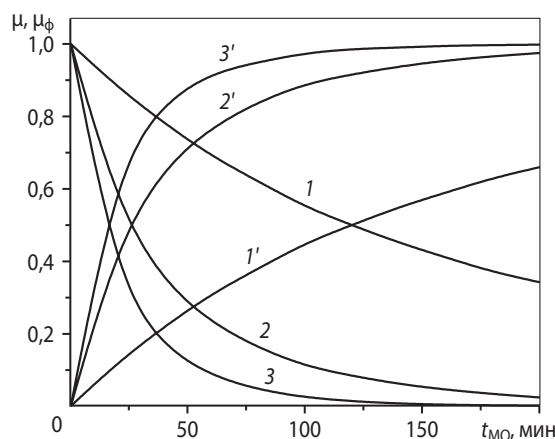


Рис. 2. Изменение объемных долей свободной смеси (1–3) и принявшего участие в футеровке вещества (1'–3')

$\Omega K_{\phi A}, \text{ мин}^{-1}$: 1, 1' – 0,003; 2, 2' – 0,015; 3, 3' – 0,03

$\Omega K_{\phi B}, \text{ мин}^{-1}$: 1, 1' – 0,01; 2, 2' – 0,05; 3, 3' – 0,1

С увеличением константы скорости футеровки, что может быть достигнуто, например, повышением мощности мельницы, вначале наблюдается значительный рост объема принявшего участие в футеровке вещества на фоне снижения объема оставшейся смеси (рис. 2). По мере развития процесса скорость футеровки уменьшается. Из расчетов следует, что при больших временах механообработки в условиях интенсивной работы мельницы возможно практически полное налипание измельчаемого вещества на стенки камеры и мелющие тела (см. кр. 2 и 3 на рис. 2).

На рис. 3 приведены диаграммы в координатах «константа скорости измельчения (k) – время механической обработки (t_{MO})» при $\delta = k/(\Omega K_{\phi}) = 15$ (а) и 3 (б), отражающие различные сценарии развития процесса при измельчении однокомпонентной смеси. Подобные диаграммы могут содержать как три области реализации режимов футеровки и измельчения (а), так и четыре (б).

Когда величина δ достаточно велика (случай а – скорость измельчения существенно выше скорости футеровки), то практически при любой мощности мельницы возможна реализация оптимальных режимов (область II), при которых в процессе МО достигается хорошее измельчение смеси ($s > s^*$), а объем ее расхода на футеровку камеры мельницы и мелющих тел не превышает определенного количества ($\mu < \mu^*$). Здесь s^* , μ^* – заданные параметры. В области I смесь недостаточно измельчена, в III – расход материала на футеровку больше заданного объема.

При небольшом различии между скоростями измельчения и футеровки (случай б, см. рис. 3) возможна ситуация, когда в условиях недостаточного

измельчения смеси ($s < s^*$) ее расход на футеровку, тем не менее, может превышать допустимый объем ($\mu < \mu^*$). Данным режимам МО соответствует область IV. Здесь достижение оптимальных режимов возможно только при высоких мощностях мельницы.

Константу скорости футеровки можно оценить или по объему принявшего участие в процессе футеровки материала ($\mu_{\text{ф}}$, см. соотношение (11)), или по объему материала, оставшегося в смеси (μ – выражение (12)). Поэтому из (11) и (12) следует, что

$$\Omega K_{\text{ф}} = -t^{-1} \ln(1 - \mu_{\text{ф}}), \quad \Omega K_{\text{ф}} = t^{-1} \ln \mu^{-1}. \quad (13)$$

Определив параметр Ω , характеризующий удельную внутреннюю поверхность мельницы,

зная экспериментальные зависимости $\mu_{\text{ф}}(t)$ или $\mu(t)$, из (13) можно вычислить константу скорости футеровки $K_{\text{ф}}$.

Другой способ оценки величины $K_{\text{ф}}$ следует из идеи разложения экспоненты в формуле (11). Так как для начальной стадии процесса футеровки справедливо приближенное равенство

$$\exp(-\Omega K_{\text{ф}} t) \approx 1 - \Omega K_{\text{ф}} t,$$

то, подставив его в (11), получим

$$\mu_{\text{ф}} = \Omega K_{\text{ф}} t.$$

Отсюда находим

$$\Omega K_{\text{ф}} = \mu_{\text{ф}}/t \quad (\text{при условии } \Omega K_{\text{ф}} t < 1). \quad (14)$$

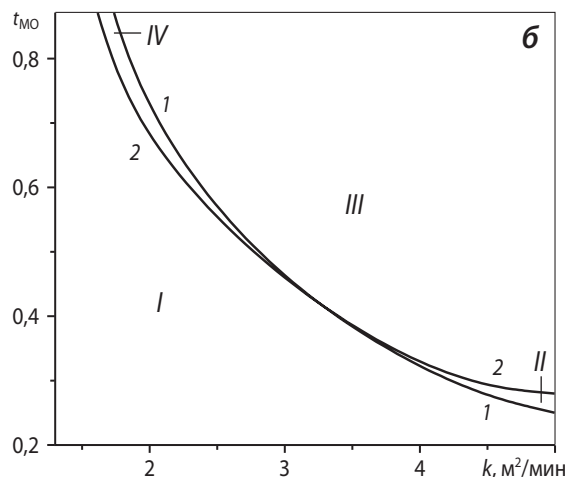
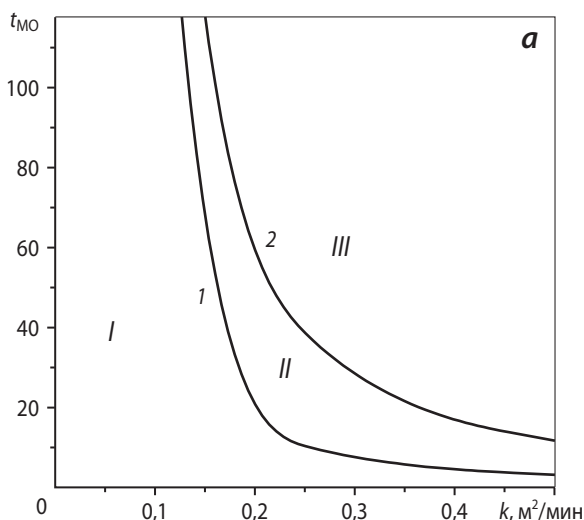


Рис. 3. Диаграммы «константа скорости измельчения – время механической обработки» при $\delta = 15$ (а) и 3 (б), $s^* = 0,8$, $\mu^* = 0,7$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

С целью проверки основных положений и выводов построенной модели были проведены специальные эксперименты. В качестве двухкомпонентной смеси была выбрана смесь из радиотехнического железа Р-10 и алюминия АСД-4 состава $2\text{Fe} + 5\text{Al}$, которую подвергали механообработке в мельнице М-3 с ускорением 45 g. В барабан объемом 1000 см³ помещали стальные шары диаметром 5–7 мм и массой 300 г и загружали смесь массой 30 г. Для уменьшения влияния возможного нагрева смеси теплом от диссипации механической энергии время измельчения набиралось в результате суммирования отдельных этапов работы мельницы (3 мин), которые чередовались с ее остановкой (10 мин). После МО в течение заданного времени смесь извлекали из мельницы вытряхиванием барабанов и подчисткой барабанов и шаров жесткой волосяной кистью и определяли ее объем. Состав смеси после МО был близок к исходному, что свидетельствует о равномерном участии компонентов в футеровке. Это позволяет считать $K_{\text{ф}i} = K_{\text{ф}}$.

На рис. 4 представлена зависимость относительной объемной доли принявшего участие в футеровке вещества от времени МО смеси $2\text{Fe} + 5\text{Al}$. С использованием экспериментальных данных (восходящая часть кр. 1) двумя способами по формулам (13) и (14) была определена константа скорости футеровки и проведены численные расчеты процесса (кр. 2 и 3). По формуле (13) константу рассчитывали методом наименьших квадратов. Из рис. 4 видно, что теоретические кривые удовлетворительно согласуются с экспериментальной

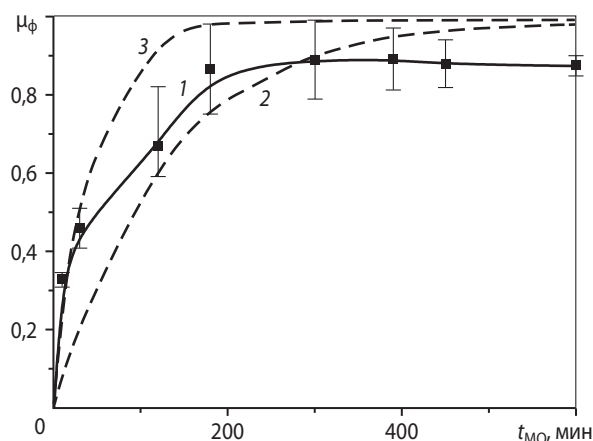


Рис. 4. Динамика доли принявшего участие в процессе футеровки вещества в результате механической обработки смеси 2Fe + 5Al
 1 – эксперимент
 2, 3 – теоретический расчет при $\Omega K_{\phi} = 0,008 \text{ мин}^{-1}$ (2) и $0,03 \text{ мин}^{-1}$ (3)

зависимостью. Величина ΩK_{ϕ} для смеси 2Fe + 5Al в условиях экспериментов, определенная по формулам (13) и (14), составила $0,008$ и $0,03 \text{ мин}^{-1}$ соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построена математическая модель футеровки в условиях механической обработки двухкомпонентной смеси в энергонапряженной мельнице. Показано, что варьирование параметров мельницы и времени МО существенно влияет на динамику футеровки измельчаемой смесью внутренней поверхности мельницы и мелющих тел.

Предложены методы оценки параметра, характеризующего скорость футеровки измельчаемой смесью.

Проведено экспериментальное исследование самофутеровки при измельчении смеси 2Fe + 5Al. С использованием экспериментальных данных определена константа скорости футеровки этой смесью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Перов В. А., Васильева А. А. // Горн. журн. 1961. № 7. С. 69.
2. Ходаков Г. С. Физика измельчения. М.: Наука, 1972.
3. Лапшин О. В., Смоляков В. К. // Физ. мезомеханика. 2011. Т. 14, № 2. С. 77.

Издательский Дом МИСиС представляет:

Технология порошковых материалов и изделий

Курс лекций

Автор: В. К. Нарва

М.: ИД МИСиС, 2012. – 171 с.

Рассмотрены вопросы формирования структуры и свойств порошковых материалов с особыми свойствами: пористых, антифрикционных, фрикционных, электротехнических. Описаны применяемые технологические схемы производства конструкционных материалов, методы повышения свойств за счет легирования основы, а также путем термической, химико-термической и термомеханической обработки. Оценены преимущества и недостатки метода порошковой металлургии применительно к материалам различного назначения.

Издание предназначено для студентов, обучающихся по специальностям 150108 «Порошковая металлургия, композиционные материалы, покрытия», 150701 «Физикохимия процессов и материалов», а также магистров, обучающихся по направлению «Металлургия».

■ ■ ■ ■ ■

Курс лекций можно купить в книжном павильоне Издательского Дома МИСиС по адресу:

Москва, Ленинский пр-т, 4, главный корпус МИСиС, цокольный этаж; тел.: **(495) 638-44-12**.

Для приобретения издания по безналичному расчету необходимо предварительно оформить заказ по электронной почте: **alek-drovna@yandex.ru** (справки по тел.: **(495) 638-44-28**).