

Перельгин Д.Н., ст. препод.,  
Севостьянов В.С., д-р техн. наук, проф.,  
Бойчук И.П., канд. техн. наук, доц.,  
Кузнецова И.А., канд. экон. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНОГО КОНТАКТА АБРАЗИВНЫХ ЧАСТИЦ С ФУТЕРОВКОЙ ВИХРЕ-АКУСТИЧЕСКОГО ДИСПЕРГАТОРА

mehanikus@mail.ru

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования процесса газообразивного изнашивания футеровки вихре-акустического диспергатора позволили установить условия и закономерности их возникновения, а также разработать предложения по его снижению.

**Ключевые слова:** высокодисперсные материалы, вихре-акустический диспергатор, газообразивный износ, контактная задача, футеровка

На современном этапе развития наукоемких технологий особую актуальность имеют: получение высокодисперсных композиционных смесей с управляемыми физико-химическими свойствами; производство широкой гаммы сухих строительных смесей различного назначения; активное развитие современных технологий глубокого обогащения металлосодержащих горных пород и др.

При выборе помольного агрегата чаще всего руководствуются технологическими, энергетическими и экономическими показателями, удовлетворяющими требованиям заказчика.

В настоящее время наиболее перспективным способом сверхтонкого измельчения является способ высокоскоростного измельчения материалов в струйных мельницах, используемых в качестве энергоносителя пар или газ. Использование высоких скоростей, до нескольких сотен метров в секунду, в так называемых кольцевых струйных мельницах, позволяет повысить не только дисперсность получаемого продукта, но и удельную производительность измельчителя, его КПД. Кроме того, появляется возможность реально использовать преимущества высокоскоростного избирательного измельчения поликомпонентных смесей для получения продуктов с заданными свойствами.

При всех преимуществах вихревых мельниц, широко используемых для тонкого измельчения материалов, они имеют и ряд недостатков: сравнительно высокий удельный расход энергии, относительно невысокую удельную производительность и увеличение загрязнения посторонними включениями при уменьшении размера частиц (менее 10 мкм) [1–4].

Остановимся более подробно на последнем недостатке. Теоретического решения задачи расчета величины газообразивного износа, несмотря на большое число исследований в этой области, пока ещё не получено, т.к. процесс газообразивного изнашивания зависит от большо-

го числа воздействующих факторов. Определенные числовые значения показателей надёжности оборудования в промышленных условиях связано с большой продолжительностью испытаний.

Величина износа рабочей поверхности определяется количеством и размерами частиц, удалённых с этой поверхности, и является случайной величиной. Величина износа за промежуток времени  $(0, t)$  определялась как интегральная функция скорости изнашивания: [5]

$$\eta(t) = \int_0^t \xi(t) dt,$$

где  $\xi(t)$  – скорость изнашивания, как случайный процесс, такой, что  $\xi(t) > 0$ , т.е. процесс изнашивания является необратимым и монотонным.

Скорость частиц, являющаяся одной из составных частей технологических сред в струйных мельницах, оказывает наибольшее влияние на скорость газообразивного изнашивания элементов агрегатов. Поэтому изучение влияния этого фактора на величину показателей надёжности конструкционных материалов представляло наибольший интерес.

Допустим, что два твердых тела (частица и поверхность камеры) соприкасаются друг с другом по линии [6–10]. Область соприкосновения представляет собой в этом случае узкую полоску шириной  $2\alpha$  (рис. 1).

Распределение давления между сдавленными телами в точках их соприкосновения будет вычисляться как

$$P_z(x) = const \cdot \sqrt{1 - \frac{x^2}{\alpha^2}}, \quad (1)$$

где  $x$  – координата вдоль ширины полосы соприкосновения,  $\alpha$  – полоса контакта. Константа определится из условия, что интеграл по области соприкосновения  $\int P_z(x) dx$  равен силе  $P$ , с которой сдавливаются тела. Тогда:

$$P_z(x) = \frac{2P}{\pi\alpha} \sqrt{1 - \frac{x^2}{\alpha^2}}. \quad (2)$$

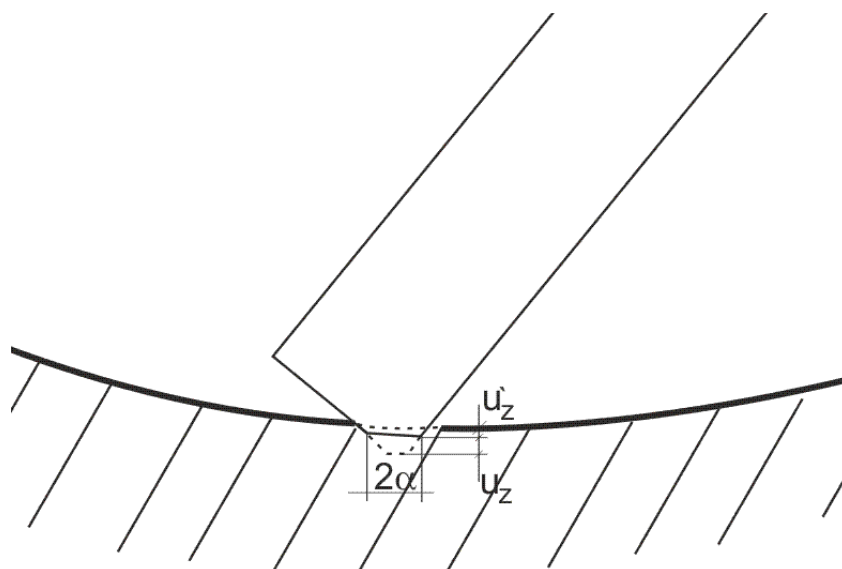


Рис. 1. Схема взаимодействия частицы с плоскостью

При касании тел, представляющих собой поверхности второго порядка, область контакта и деформация тел определяется формулами:

$$A = \frac{P}{\pi K} \int_0^\infty \frac{d\xi}{(\alpha^2 + \xi) \sqrt{(\alpha^2 + \xi)(\beta^2 + \xi)\xi}}, \quad (3)$$

$$h = \frac{P}{\pi K} \int_0^\infty \frac{d\xi}{\sqrt{(\alpha^2 + \xi)(\beta^2 + \xi)\xi}}, \quad (4)$$

где  $K$  – эффективный модуль Юнга:

$$\frac{1}{K} = \frac{3}{4} \left( \frac{1 - \sigma^2}{E} + \frac{1 - \sigma'^2}{E'} \right), \quad (5)$$

$E, E'$  – модули Юнга,  $\sigma, \sigma'$  – коэффициенты Пуассона.

Уравнение (3) определяет полуось области соприкосновения  $\alpha$  при заданной силе ( $A$  – известная для данных тел величина). После этого с помощью соотношения (4) определяется зависимость между силой  $P$  и вызываемым ею сближением тел  $h$ .

Подставив (2) в (3) и произведя интегрирование, получим

$$A = \frac{8P}{3\pi\alpha^2 K}. \quad (6)$$

Так как радиус кривизны камеры равен радиусу камеры  $R$ , а радиус кривизны линии равен бесконечности, то

$$A = \frac{1}{2R}. \quad (7)$$

Тогда полоса контакта

$$\alpha = \sqrt{\frac{16PR}{3\pi K}}. \quad (8)$$

Сближение  $h$  выражается через силу  $P$  соотношением

$$h = P^{2/3} \left( \frac{1}{K^2 R} \right)^{1/3}. \quad (9)$$

Смещения  $u_z, u'_z$  под влиянием нормальных сил  $P_z(x)$  определяются выражениями

$$u_z = \frac{1 - \sigma^2}{\pi E} \int \frac{P_z(x')}{r} dx', \quad (10)$$

$$u'_z = \frac{1 - \sigma'^2}{\pi E'} \int \frac{P_z(x')}{r} dx', \quad (11)$$

где  $r = \sqrt{x^2 + z^2}$ .

В том случае, когда сила  $P$  является сосредоточенной

$$u_z = \frac{1 - \sigma^2}{\pi E} \frac{P_z}{r}. \quad (12)$$

В выражениях (10), (11) интегралы являются эллиптическими. Аналитическое решение представляется в виде суммы неполных эллиптических интегралов первого и второго рода.

Напряжения  $\sigma_{ik}$ , возникающие в материале, определяются тензором скоростей деформации  $u_{ik}$ :

$$\sigma_{ik} = K_1 u_{ll} \delta_{ik} + 2\mu \left( u_{ik} - \frac{1}{3} \delta_{ik} u_{ll} \right), \quad (13)$$

где  $K_1$  – модуль всестороннего сжатия,  $\mu$  – модуль сдвига. В рассматриваемом случае

$$u_{ik} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial u_z}{\partial z} \end{pmatrix}, \quad (14)$$

из чего следует, что не нулевым будет только нормальное напряжение  $\sigma_{33}$

$$\sigma_{33} = \left( K_1 + \frac{4\mu}{3} \right) u_{33}. \quad (15)$$

Формулы (10), (11), (15) дают возможность вычислять деформацию камеры и нормальное контактное напряжение, возникающее на поверхности футеровки вихре-акустического диспергатора. Численные расчеты показали, что при силе  $P = 3$  кН  $\alpha = 1,45 \cdot 10^{-4}$  м,  $h = 3,19 \cdot 10^{-5}$ , деформация частицы составляет  $2,75 \cdot 10^{-5}$  м, а деформация камеры –  $4,42 \cdot 10^{-6}$  м.

Во время опытно-промышленной апробации вихре-акустического диспергатора на ООО «ОксиБел» проводились исследования по выявлению следов абразивного износа футеровки камеры помола вихре-акустического диспергатора. Визуальная проверка на наличие износа проводилась ежедневно (после измельчения 100 кг материала). Внутренняя поверхность помольной камеры была зашлифована, (блестящей), следов образования газообразивного изнашивания металла нет.

На рис. 2 представлена футеровка камеры измельчения вихре-акустического диспергатора со следами газообразивного износа.

После проведения всей серии экспериментов (около 800 кг) обозначился износ элементов футеровки. Наибольшему износу подверглась внутренняя поверхность кольца, идущая сразу за подающим энергоносителем соплом. На этом участке наряду с общим износом по ширине помольной камеры глубиной около 0,5 мм, имеет место узкий локальный износ в верхней части помольной камеры шириной и глубиной около 3 – 4 мм в виде раковины, образованной абразивным износом двухкомпонентной смесью, направленной из подающего сопла. По мере удаления от подающего сопла износ по ширине камеры уменьшается и перед выходным отверстием поверхность почти не изношена. Также имеет место явно выраженный износ поверхности резонаторов, лежащих на пути прохождения материала и воздуха (крайние выходные поверхности) износ, которых также уменьшается по мере удаления от подающего отверстия.

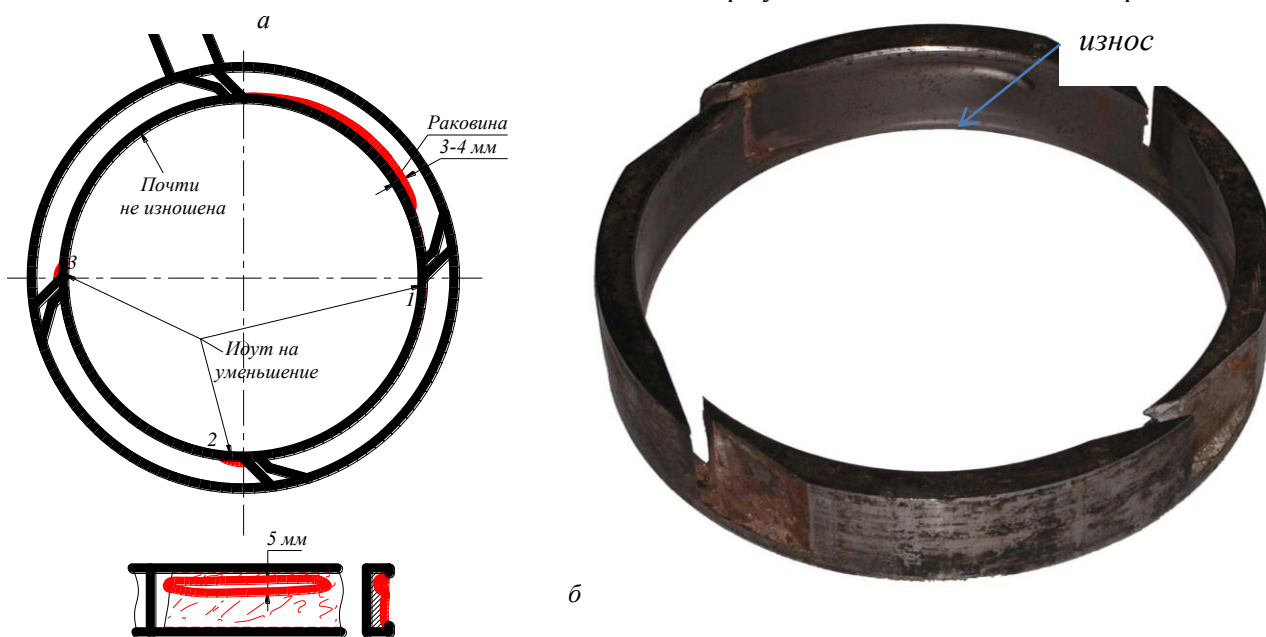


Рис. 2. Футеровка камеры измельчения вихре-акустического диспергатора: а – фотография футеровки; б – схема газообразивного изнашивания футеровки

Одним из критериев экономической эффективности использования вихре-акустического диспергатора является стоимость ремонта и обслуживания. С этой целью нами были проведены исследования по определению удельного износа камеры помола.

Средний удельный износ рабочих элементов можно представить следующей функциональной зависимостью:

$$I_{cp} = f(v, Q, \sigma_n, \sigma_p, d_{cp})$$

Время работы рабочего элемента до его замены можно определить из уравнения:

$$t = \frac{\eta_3 * G_3}{Q_{\Sigma R004} * I_{cp}}$$

где  $\eta_3$  – коэффициент запаса на износ в случае полной выработки,  $\eta_3 = 0,38$ ;  $G_3$  – масса футеровки камеры помола, кг.

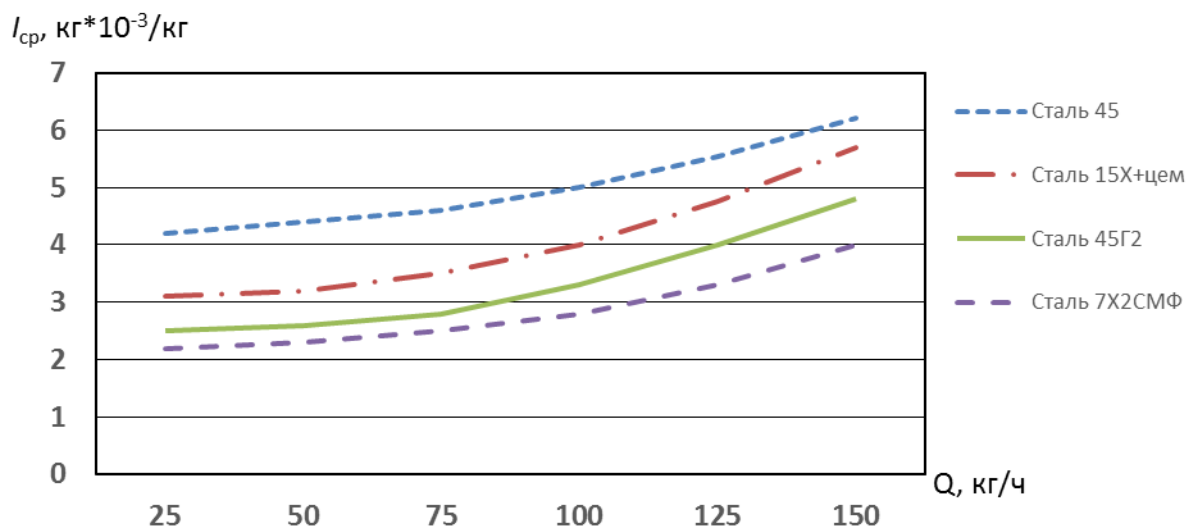


Рис. 3. Графическая зависимость удельного износа поверхности рабочих элементов  $I_{ср}$  от приведенной производительности  $Q$  вихре-акустического диспергатора

Таким образом, на основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований нами установлен процесс газообразного износа камеры измельчения вихре-акустического диспергатора и предложена зависимость удельного износа поверхности футеровки от приведенной производительности диспергатора. Выполненные исследования позволяют повысить эффективность процесса измельчения материалов в вихре-акустических диспергаторах и их эксплуатационную надежность.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Севостьянов В.С., Перельгин Д.Н., Уральский В.И., Горлов А.С., Глаголев Е.С., Бабаевский А.Н. Разработка и исследования энергосберегающего помольного оборудования для высокодисперсного измельчения материалов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. №3. С. 76-80.
2. Патент РФ № 2226432. Вихреакустический диспергатор / Севостьянов В.С., Лесовик В.С., Перельгин Д.Н., Горлов А.С., Нечаев С.П. 10.04. 2004, Бюл. №10.
3. Патент РФ № 2250138. Вихре-акустический диспергатор / Гридчин А.М., Севостьянов В.С., Лесовик В.С., Горлов А.С., Перельгин Д.Н., Федоренко Б.З.; 20.04.2005, Бюл. № 11.
4. Патент РФ № 2317147 Вихре-акустический диспергатор-смеситель (варианты) / Севостьянов В.С., Гридчин А.М., Нечаев С.П., Лесовик В.С., Горлов А.С., Перельгин Д.Н. 28.02.2008 Бюл. №5.
5. Маннапов Р.Г. Исследование агрегатов химических производств, работающих в условиях газообразного изнашивания, и разработка мероприятий по повышению их надежности//Автореферат дисс. на соиск.уч.степени к.т.н. МИХМ, 1977.
6. Клейс И. Р., УумыйсХ. Г. Износостойкость элементов измельчителей ударного действия. М.: Машиностроение, 1986. 168 с.
7. Абрамов Ю. И. Соударение твердых частиц пыли с преградой из упруго пластического материала // Трение и износ. 1987. Т. 8 № 1. С. 83-94.
8. Виноградов В. Н., Сорокин Г. М, Албагачиев А. Ю. Изнашивание при ударе. М.: Машиностроение, 1982. 192 с.
9. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия / Под ред. Р.В. Гольдштейна: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 510 с.
10. Михин И. М. Внешнее трение твердых тел. М.: Наука, 1974. 122с.