

УДК 621.926.4

КОМБИНИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА ЛОПАСТЕЙ РОТОРА-УСКОРИТЕЛЯ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ МЕЛЬНИЦЫ

П. Е. ВАЙТЕХОВИЧ

Предложена комбинированная модель расчёта интенсивности абразивного износа лопастей ротора-ускорителя центробежной мельницы. Она включает определение скорости соударения и угла атаки частиц, расчёт ударно-абразивного износа, определение скорости движения частиц вдоль лопасти и расчёт износа при истирающем воздействии. Установлено, что износ при истирании в 1,5 раза ниже, чем при ударе. Адекватность комбинированной модели подтверждена хорошей сходимостью результатов расчёта с экспериментальными данными.

Ключевые слова: абразивный износ, частица, движение, скорость удара, угол атаки, интенсивность износа, сила давления, сегмент заглубления, площадь среза.

Введение. В производственных условиях абразивный износ представляется серьёзной проблемой, особенно для таких агрегатов, как смесители, измельчители, пневмотранспортные оборудование. По некоторым данным за счёт абразивного износа в мировом масштабе в год безвозвратно теряется несколько миллионов тонн высококачественной стали. Значительная доля этих потерь приходится на измельчающие машины. Причём среди них интенсивным износом выделяются быстроходные агрегаты ударного действия, к которым относятся и ударно-центробежные. [1—3].

Основным узлом этих измельчителей является лопастной ротор-ускоритель. Измельчаемый материал подаётся в центральную зону ротора, разгоняется до высокой скорости и отбрасывается к отбойной поверхности. При ударе об отбойные элементы частицы материала разрушаются и выводятся из зоны помола. При этом максимальному абразивному износу подвергаются лопасти ускорителя и отбойные элементы [2]. Сравнивая воздействия абразивных частиц на эти два узла, можно отметить, что износ отбойных элементов приводит только к снижению эффективности помола. А вот неравномерный износ лопастей ротора-ускорителя влечёт за собой нарушение рабочего цикла измельчителя в целом. Как результат — возникновение биений, вибрации, износ вала и подшипников. По этой причине прогнозирование интенсивности износа лопастей ускорителя можно считать крайне важной задачей [2].

Цель работы — составление физической модели износа лопастей и её математического описания, учитывающего влияние угловой скорости ротора, диаметра и начального расположения абразивных частиц, позволяющего рассчитать такие важные параметры, как скорость их движения, угол атаки в месте соприкосновения с лопастью, и в итоге установить зависимость интенсивности износа от указанных параметров.

Объект исследования. В качестве объекта исследования выбрана ударно-центробежная мельница, обеспеченная ротором, с установленными на нем прямолинейными лопастями. Они могут быть прикреплены как радиально, так и тангенциально по отношению к окружности, ограничивающей зону распределения. Причём тангенциальная установка лопастей реализуется в двух вариантах: повернутых на 90° по ходу вращения ротора (“вперёд”) и на такой же угол против вращения

Белорусский государственный технологический университет. Беларусь, 220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а.
e-mail: vpe51@mail.ru.

(“назад”). Экспериментальные исследования мельниц с различными конструкциями роторов [2] показали, что максимальная эффективность измельчения достигается при использовании ротора с лопастями, повернутыми “вперёд”. По этой причине моделирование интенсивности износа в данной работе проводилось именно для такой конструкции ротора. Более того, с целью обеспечения возможности сравнения расчётных данных с экспериментальными, полученными в работе [2], все конструктивные и технологические параметры при аналитических исследованиях приняты идентичными. Так, диаметр ротора-ускорителя составлял 460 мм, начальный радиус установки лопастей, соответствующий радиусу зоны распределения, — 80 мм. Диапазон изменения угловой скорости ротора варьировался в интервале 150÷470 рад/с.

Постановка задачи. Анализ работ по исследованию износа [4—6] показал, что его интенсивность зависит от множества факторов: размера и концентрации частиц, их твёрдости, влажности, физических свойств материала, из которого изготовлены рабочие органы машин. Но в измельчителях ударного действия преобладающими факторами являются скорость удара и угол атаки абразивных частиц. В этой связи перед составлением математической модели абразивного износа необходимо изучить характер движения измельчаемого материала в зоне распределения и в межлопастном пространстве ротора-ускорителя центробежной мельницы. Методика определения скорости и траектории движения частиц рассмотрена в работе [3].

После равномерного распределения в центральной зоне частицы измельчаемого материала начинают свободно перемещаться в межлопастном пространстве по поверхности вращающегося диска. Под воздействием инерционных сил они движутся по криволинейным траекториям до соприкосновения с лопастями. Естественно, что, начиная перемещение из разных промежуточных точек (рис. 1, точки 1, 2, 3), частицы столкнутся с лопастью на разном расстоянии от начала отсчёта. В дальнейшем они продолжают движение вдоль лопасти до момента вылета из ротора.

Отмеченное выше говорит о том, что задачу следует разделить на четыре отдельных и одновременно взаимосвязанных фрагмента: определение траектории движения частиц по диску с расчётом скорости соударения и угла атаки; расчёт ударно-абразивного износа; определение скорости движения частиц вдоль лопасти; составление и апробация модели истирающего воздействия абразивных частиц на поверхность лопасти.

Составление математической модели и её апробация. Задачи по свободному перемещению частиц обычно решаются с использованием уравнения относительного движения. Согласно расчётной схеме (рис. 1) оно в общем случае имеет вид:

$$m\vec{a}_d = \vec{F}_r + \vec{F}_c + \vec{F}_e. \quad (1)$$

В проекциях на оси полярной системы координат и с учётом того, что все силы массовые, уравнение (1) преобразуются в систему:

$$\begin{cases} \ddot{r} - r(\dot{\phi})^2 = -fg \frac{\dot{r}}{\sqrt{(\dot{r})^2 + (r\dot{\phi})^2}} - 2\omega r\dot{\phi} + \omega^2 r; \\ r\ddot{\phi} + 2\dot{r}\dot{\phi} = -fg \frac{r\dot{\phi}}{\sqrt{(\dot{r})^2 + (r\dot{\phi})^2}} + 2\omega\dot{r}. \end{cases} \quad (2)$$

При этом относительная скорость

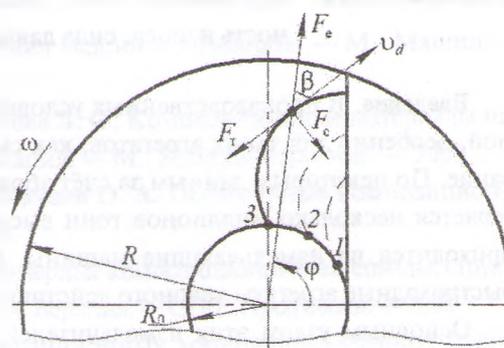


Рис. 1. Расчётная схема для определения траектории движения частиц

$$v_d = \sqrt{(\dot{r})^2 + (r\dot{\phi})^2}. \quad (3)$$

Расчёт координат траектории движения по уравнениям (2) проводился с использованием пакета прикладных программ Mathcad. Начальные условия при этом — $R_0 = 80$ мм. Скорость на входе в межлопастное пространство рассчитывалась по методике, изложенной в работе [3]. Граничные условия, при которых заканчивались расчёты, определялись моментом соприкосновения частиц с лопастью, или по-другому — пересечением траектории движения частиц с прямой линией, совпадающей с положением лопасти на роторе. В принятой системе координат для лопасти, повернутой “вперёд”, уравнение этой прямой

$$r = \frac{R_0}{\cos\phi}. \quad (4)$$

Все расчёты проводились для трех начальных расположений частиц в межлопастном пространстве (рис. 1), характеризующихся угловой координатой $\gamma = 30^\circ; 60^\circ; 90^\circ$. Результаты расчёта представлены в виде графической зависимости $v_d = f(\omega)$, (рис. 2). Относительная скорость в данном случае представляет собой скорость удара частиц о лопасть.

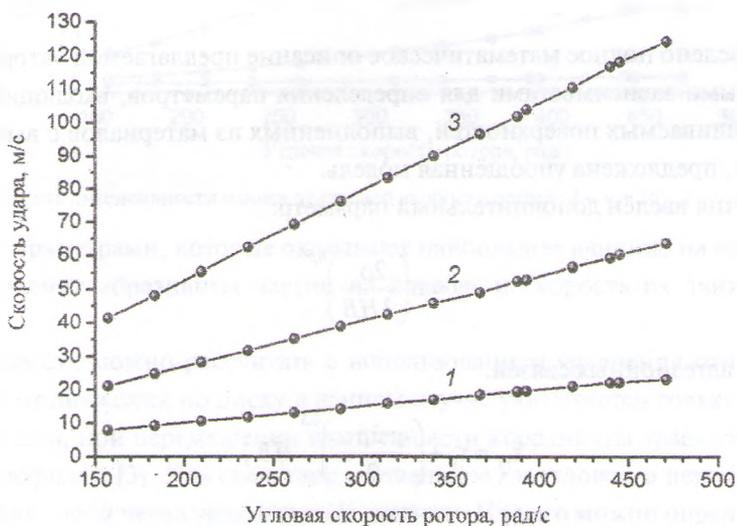


Рис. 2. Зависимость скорости удара от угловой скорости ротора: 1 — $\gamma = 30^\circ$; 2 — $\gamma = 60^\circ$; 3 — $\gamma = 90^\circ$

Скорость удара линейно увеличивается при повышении угловой скорости ротора. Одновременно эта скорость значительно выше для частиц, начинающих движение с наибольшего отдаления от лопасти ($\gamma = 90^\circ$). Максимальная её величина достигает 125 м/с.

Угол атаки для данной схемы установки лопастей в соответствии с расчётной схемой (рис. 1) определяется по формуле:

$$\alpha = \beta + \arcsin \frac{R_0}{r}. \quad (5)$$

Он незначительно увеличивается при изменении начального положения частиц (от $\alpha = 23^\circ$ при $\gamma = 30^\circ$ до $\alpha = 31^\circ$ при $\gamma = 90^\circ$) и не зависит от угловой скорости ротора, оставаясь стабильным для каждого угла γ во всем диапазоне варьирования.

Подобен характер изменения и радиуса контакта частиц с лопастью. Если представить его в виде относительной величины $\bar{r} = r/R$, то для начального угла $\gamma = 30^\circ$ он составляет $\bar{r} = 0,44$, для $\gamma = 60^\circ$ — $\bar{r} = 0,67$ и $\gamma = 90^\circ$ — $\bar{r} = 0,81$. Причём эти значения остаются постоянными при всех угловых скоростях.

Освоение методики расчёта скорости удара и угла атаки частиц даёт возможность перейти к определению интенсивности абразивного износа. Анализ моделей ударно-абразивного изнашивания [7] показал, что наиболее адекватной из них, учитывающей максимальное количество факторов, является модель Бекмана-Гоцмана [8].

Эту модель можно назвать деформационной. Авторы рассматривают образование лунки при ударе частицы о металлическую поверхность и её перемещение в границах этой лунки. Весь путь разделяется на три участка, характеризующихся определённым видом деформации: упругой, пластической с достижением температуры плавления, выносом расплавленного металла из лунки. Процесс деформации сначала рассматривается на элементарном уровне с последующим интегрированием. В качестве основной характеристики принята объёмная интенсивность износа W (мм³/кг):

$$W = \frac{\Delta V}{m} . \quad (6)$$

С учётом разных механизмов деформирования и удаления продукта износа получена интегральная зависимость для объёмной интенсивности износа, состоящая из двух слагаемых:

$$W = \frac{3}{4\pi\rho_c e_s} (\tau_{s1} I_1 + \tau_{s2} I_2) . \quad (7)$$

В работе [8] приведено полное математическое описание предлагаемой авторами модели износа со всеми расчётными зависимостями для определения параметров, входящих в уравнение (7). Более того, для изнашиваемых поверхностей, выполненных из материалов с высокой плотностью и модулем упругости, предложена упрощённая модель.

С целью упрощения введён дополнительный параметр:

$$\psi = \nu \left(\frac{2\rho_c}{3HB} \right)^{0,5} . \quad (8)$$

Тогда прочность адгезионных связей:

$$\tau_{s1} = \tau_0 + \left(\frac{\psi \sin \alpha}{2} \right)^{0,5} HB , \quad (9)$$

$$\tau_{s2} = \tau_0 + \left(\frac{2\psi \sin \alpha}{1 - \psi \sin \alpha} \right)^{0,5} HB . \quad (10)$$

Напряжение τ_0 является характеристикой материала изнашиваемой поверхности.

Параметры, характеризующие изменение относительной поверхности при срезе, рассчитываются по формулам:

$$I_1 = 6,81\psi^{0,25} \cos^2 \alpha \sin^{0,5} \alpha \quad (11)$$

$$I_2 = 0,65\psi^2 \sin^2 \alpha \quad (12)$$

Константой изнашиваемого материала является и плотность энергии среза e_s .

Апробация методики расчёта интенсивности изнашивания по формулам (7–12) проведена для лопастей, изготовленных из Ст3. В качестве абразивного материала принимался кварцевый песок. По ходу расчёта изменялась угловая скорость ротора ω и начальный угол расположения частиц γ . Результаты расчёта представлены на рис. 3.

Из графической зависимости $W = f(\omega)$ видно, что увеличение угловой скорости ротора приводит к повышению износа. Его величина при максимальных угловой скорости и начальном расположении частиц ($\gamma = 90^\circ$) достигает 71,6 мм³/кг.

Одновременно, для частиц, расположенных в начальный момент ближе к лопасти ($\gamma = 30^\circ$), износ значительно меньше и не превышает $1,5 \text{ мм}^3/\text{кг}$. Это обусловлено, в первую очередь, уменьшением скорости удара, а частично и угла атаки. Следует предположить, что при уменьшении начального угла ($\gamma < 30^\circ$), ударно-абразивный износ вообще будет сведён до нулевого значения. Но вместе с тем, частицы абразива, двигаясь вдоль лопасти, будут изнашивать их за счёт истирающего эффекта.

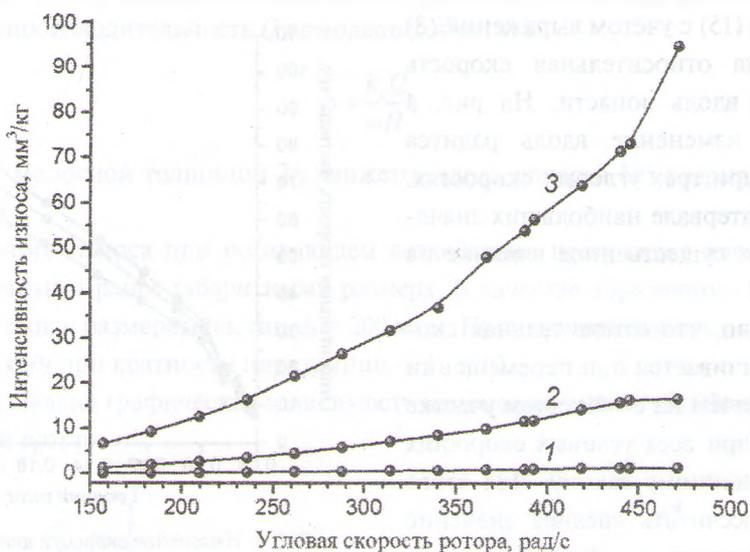


Рис. 3. Зависимость интенсивности износа от угловой скорости ротора: 1 – $\gamma = 30^\circ$; 2 – $\gamma = 60^\circ$; 3 – $\gamma = 90^\circ$

Важнейшими параметрами, которые оказывают наибольшее влияние на износ при истирании, являются сила давления абразивных частиц на лопасть и скорость их движения относительно лопасти [9–11].

Указанную скорость можно рассчитать с использованием уравнения относительного движения (1). В отличие от движения по диску в данном случае учитывается только сила трения частиц по лопасти. Более того, при перемещении вдоль лопасти координаты траектории частицы жёстко ограничены её профилем [3]. Как следствие, радиальное r и угловое φ перемещение в уравнениях (2) связаны между собой через уравнение (4) лопасти. Из него можно определить угловую координату (13) и её производную (14).

$$\varphi = \arccos \frac{R_0}{r}, \tag{13}$$

$$\dot{\varphi} = -\frac{1}{\sqrt{1-(R_0/r)^2}} \tag{14}$$

Подставив выражения (13) и (14) в первое уравнение системы (2), получим:

$$\ddot{r} - \frac{r}{\sqrt{1-(R_0/r)^2}} = -2f\omega\dot{r} + \omega^2 r - 2\omega_1 \frac{r}{\sqrt{1-(R_0/r)^2}} \tag{15}$$

Это уравнение с одной переменной r описывает движение частиц вдоль лопасти соответствующего профиля.

Сила давления при движении частицы вдоль прямолинейной лопасти, повернутой “вперёд” (рис. 1).

$$F = F_c + F_c \cos \varphi, \tag{16}$$

где $\cos\varphi = R_0/r$.

Из уравнения (16) видно, что она зависит только от инерционных сил. Подставим выражения для их определения, а также для функции косинуса, и с учётом массы шарообразной частицы абразива получим

$$F = \frac{4}{3} \pi r_0^3 \rho_c (2\omega^2 r_d + \omega^2 R_0). \quad (17)$$

По уравнению (15) с учётом выражений (3) и (14) определена относительная скорость движения частиц вдоль лопасти. На рис. 4 представлено её изменение вдоль радиуса (длины лопасти) при трёх угловых скоростях. Они выбраны в интервале наибольших значений, оказывающих существенное влияние на силу давления (17).

Из рис. 4 видно, что относительная скорость частиц увеличивается при перемещении вдоль лопасти. Причём на стабильном участке при $r \geq 0,1$ м она при всех угловых скоростях изменяется по линейному закону. Для этого участка можно рассчитать среднее значение относительной скорости и по ней среднюю силу давления.

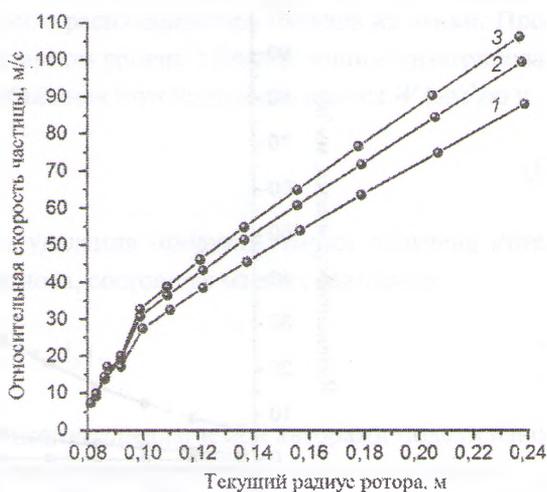


Рис. 4. Изменение скорости движения по радиусу:
1 — $\omega = 390$ рад/с; 2 — $\omega = 440$ рад/с; 3 — $\omega = 470$ рад/с

Определение основных параметров позволяет перейти непосредственно к расчёту величины абразивного износа. По физической сущности износ истиранием подобен процессу шлифования, который довольно основательно изучен экспериментально. Но работ теоретической направленности по этому процессу крайне недостаточно. Одной из них, в которой проведён его всесторонний анализ, предложена математическая модель для определения основных закономерностей, является работа Ходакова [12]. Модель шлифования в ней, как и в других работах, базируется на том, что одиночное сферическое зерно абразива при движении вдоль поверхности срезает слой материала с поперечным сечением, равным сегменту заглубления.

Глубину внедрения зерна по результатам анализа различных моделей [12] рекомендуется определять по универсальной формуле Герца:

$$h = \sqrt[3]{\left(\frac{3F(1-\mu^2)}{4E}\right)^2 \frac{1}{\sqrt[3]{r_0}}}. \quad (18)$$

По ней рассчитывается угол сектора θ (рад.), ограничивающего сегмент заглубления. Этим углом и радиусом абразивного зерна определяется площадь сегмента его заглубления в металлическую поверхность, т. е. площадь срезаемого слоя металла:

$$S_m = 0,5r_0^2(\theta - \sin\theta). \quad (19)$$

Произведение площади поперечного сечения на скорость перемещения зерна представляет собой объёмный расход удалённого металла с поверхности лопасти. Это та величина, которая зафиксирована в формуле (6).

Площадь проходного сечения S представляется как площадь элементарной ячейки в виде квадрата со стороной $2r_0$ и равна $S = 4r_0^2$. Она включает площадь, занятую зерном абразива $S_0 = \pi r_0^2$, и пустоты. Соотношение площадей составляет $S_0/S = 0,785$. Массовый расход абразива определяется по зерну за вычетом пустот.

Скорость движения абразива и среза металла равны. Тогда объёмная интенсивность изнашивания по аналогии с моделью Бекмана-Гоцмана в $\text{мм}^3/\text{кг}$ определится по формуле:

$$W = \frac{S_m}{\pi r_0^2 \rho_c} \cdot 10^9. \quad (20)$$

Формула (20), полученная для элементарной ячейки, применима при определённых условиях для расчёта износа по всей поверхности лопасти. Эти условия основаны на сплошности среды и проверяются через производительность Q помольного агрегата:

$$\delta = \frac{k_u Q}{vH}, \quad (21)$$

Если $\delta \geq 2r_0$, то монослой толщиной $2r_0$ движется вдоль лопасти без разрыва и предложенная модель применима.

Расчёт абразивного износа при истирающем воздействии проводился для лопастей ротора-ускорителя с указанными ранее габаритными размерами. В качестве абразивного материала принимался кварцевый песок с размером частиц $d_0 = 200$ мкм. Производительность помольного агрегата задавалась $Q = 300$ кг/ч при кратности циркуляции — $k_u = 10$.

На рис. 5 представлена графическая зависимость изменения указанной интенсивности износа от угловой скорости ротора.

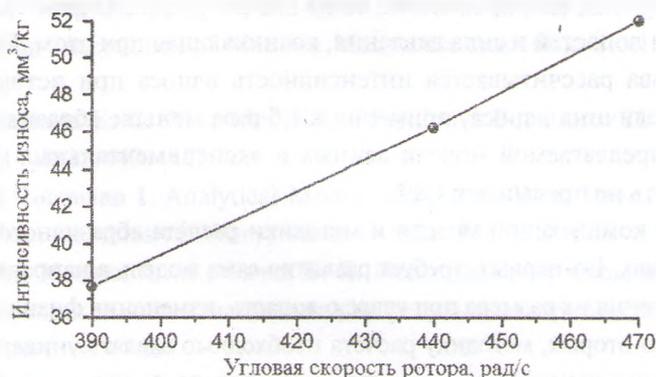


Рис. 5. Зависимость интенсивности износа от угловой скорости при истирании

Как и при ударно-абразивном износе в данном случае интенсивность изнашивания возрастает с увеличением угловой скорости ротора. Правда, её значения, примерно, в 1,5 раза ниже. Но вместе с тем, истирающее воздействие вносит существенный вклад в общую величину абразивного износа лопастей ротора ударно-центробежной мельницы.

Любая вновь разработанная методика расчёта требуют проверки и подтверждения её адекватности. Естественно, что такой проверкой является прежде всего эксперимент, а, если говорить более конкретно, то сходимость расчётных и экспериментально определённых значений каких-то параметров.

В этой связи следует отметить, что автор столкнулся с существенными трудностями, обусловленными ограниченностью информации по экспериментальным исследованиям износа конструктивных элементов ударно-центробежных мельниц. Сходимость результатов, полученных по модели ударно-абразивного износа, подтверждается экспериментальными данными Бекмана [8]. Так, например, расчётным путём при частоте вращения ротора 4200 об/мин, что соответствует угловой скорости 439,6 рад/с и линейной скорости 99 м/с, получено значение интенсивности износа 71,6 $\text{мм}^3/\text{кг}$ (рис. 3). У Бекмана [8] приводятся данные по абразивному износу пластины из Ст.3 путём обработки её кварцевым песком, подаваемым со скоростью 90 м/с. В зависимости от угла атаки интенсивность износа изменяется при этом в пределах $50 \div 80$ $\text{мм}^3/\text{кг}$.

К сожалению, все эти данные получены на экспериментальных стендах без учёта конструктивных особенностей реальных промышленных объектов. Только в работах “НПО “Центр”” приводятся экспериментальные данные по исследованию абразивного износа промышленного образца ударно-центробежной мельницы [2]. Более того, разработка модели износа и её апробация велась автором именно для такой конструкции с идентичными геометрическими соотношениями.

Реализация комбинированной модели предполагает то, что к указанной ранее величине интенсивности ударно-абразивного износа следует добавить её значение, полученное за счёт истирания. При такой же частоте вращения 4200 об/мин она составляет 46,2 мм³/кг (рис. 5). Суммарный абразивный износ лопасти, рассчитанной по предложенной модели, учитывающий удар и истирание равен 117,8 мм³/кг.

По экспериментальным данным “НПО “Центр”” [2], полученным в результате статистической обработки, абразивный износ лопастей ротора-ускорителя при той же частоте вращения составил 0,319 кг/т. При перерасчёте на принятые в данной работе единицы измерения это преобразуется в 123 мм³/кг. Расхождение расчетных и экспериментальных данных не превышает 4,8%, что указывает на хорошую сходимость и в целом адекватность модели расчета.

Заключение. Разработана комплексная модель абразивного износа лопастей ротора-ускорителя центробежной мельницы. Она включает четыре составных части. В первой из них на основе решения дифференциальных уравнений движения абразивных частиц по вращающемуся диску определяется скорость удара о лопасти и угол атаки. Во второй с использованием модели Бекмана-Гоцмана рассчитывается ударно-абразивный износ. Далее определяется скорость движения частиц вдоль поверхности лопастей и сила давления, возникающая при этом. По этим двум параметрам по модели Ходакова рассчитывается интенсивность износа при истирающем воздействии. Установлено, что эта величина износа, примерно в 1,5 раза меньше абразивно-ударного. Сравнение рассчитанных по предлагаемой модели данных и экспериментальных показало их хорошую сходимость, погрешность не превышает 4,8%.

Совершенствование комплексной модели и методики расчёта абразивного износа может развиваться в двух направлениях. Во-первых, требует развития сама модель в направлении учёта взаимного влияния частиц, уменьшения их размера при ударе о лопасть, изменения физических свойств изнашиваемых поверхностей. Во-вторых, методику расчёта необходимо сделать универсальной, пригодной к использованию для различных конструктивных вариантов лопастей роторов и отбойных элементов.

Предложенная методика расчёта абразивного износа может быть использована не только для ударно-центробежных, но и для других измельчителей, а также для любых агрегатов роторного типа, в которых сплошная движущаяся среда содержит дисперсные абразивные включения. К таким агрегатам относятся вентиляторы, газодувки, метатели различных типов. Использование комплексной модели даёт возможность сделать предварительную оценку величины абразивного износа, а, соответственно, подобрать конструктивный материал, обеспечивающий его снижение до минимальных значений. Естественно, что в результате этого будут снижены потери металла и получен экономический эффект.

Обозначения

m — масса частицы; a_d — ускорение относительного движения; F , F_r — силы давления и трения; F_e и F_c — инерционные переносная и кориолисова силы; r , \dot{r} , \ddot{r} — радиальная координата и её производные; φ , $\dot{\varphi}$, $\ddot{\varphi}$ — угловая координата и её производные; f — коэффициент трения частиц по диску; ω — угловая скорость ротора; α , β , γ , θ — углы атаки, вектора скорости, расположения частиц, сегмента заглубления; v — скорость движения, удара; v_d — относительная скорость; R , R_0 — радиус ротора и начальный радиус установки лопастей; W — объёмная интенсивность износа; ΔV — уменьшение объёма образца за время опыта; ρ_c — плотность абразива; HB — твёрдость металла; τ_s , τ_{s2} , τ_0 — прочность адгезионных связей на срез; J_1 , J_2 — параметры, характеризующие

ющие изменения относительной поверхности при срезе; e_s^* — плотность энергии среза; r_0 — радиус частицы абразива; h — глубина внедрения зерна; E — модуль упругости; μ — коэффициент Пуассона; S_m , S — площади сегмента заглупления и частицы; $k_{ц}$ — кратность циркуляции материала; δ — толщина слоя материала; H — высота лопасти; Q — производительность по абразиву и срезаемому металлу.

Литература

1. Бароха Э. Л., Воробьев В. В., Горобец А. В. Центробежные дробилки и мельницы ударного типа // Матер. 3-й междунар. науч.-техн. конф. "Центробежная техника — высокие технологии". — Минск: ОАО "НПО Центр". — 2008, 5—15
2. Таболич А. В., Бондаренко С. Н. Конструктивные возможности повышения износостойкости ускорителей центробежно-ударных мельниц // Горная механика и машиностроение. — 2016, № 2, 71—77
3. Вайтехович П. Е., Гребенчук П. С., Таболич А. В., Верховодка А. А. Влияние конструктивных особенностей ротора на скорость измельчаемого материала в центробежно-ударных дробилках // Горная механика и машиностроение. — 2017, № 2, 54—63
4. Крагельский И. В. Трение и износ — М.: Машиностроение. — 1968
5. Juan R. Laguna-Camacho and Vite-Torres M. Solid Particle Erosion on Different Metallic Materials // Tribologia in Ingeneering. — 2013 (5), 63—78
6. Chen H., Zhao D., Wang Q., Qiang Y., and Qi J. Effects of Impact Energy on the Wear Resistance and Work Hardening Mechanism of Medium Manganese Austenitic Steel // Friction. — 2017 (5), no. 4, 447—454
7. Meng H. C. and Ludema K. C. Wear Models and Predictive Equations: Their Form and Content // Wear. — 1995 (181—183), 443—457
8. Beckmann G. and Gotzmann I. Analytical Model of the Blast Wear Intensity of Metals Based on a General Arrangement for Abrasive Wear // Wear. — 1981 (73), 325—353
9. Солдатенков И. А., Мезрин А. М., Сачек Б. Я. Использование модели изнашивания жестких тел для идентификация закона изнашивания по результатам трибоиспытаний // Трение и износ. — 2015 (36), № 6, 683—689
10. Khan Z. A. Chacko V., and Nasir H. A Review of Friction Models in Interacting Joints for Durability Design // Friction. — 2017 (5), no. 1, 1—22
11. Ding C., Zhu H., Sun G., Zhou Y., and Zou X. Chaotic Characteristics and Attractor Evolution of Friction Noise during Friction Process // Friction. — 2017 (6), no. 1, 47—61
12. Ходаков Г. С. Механизм абразивного шлифования стекла // Оптико-механическая промышленность. — 1985, № 5, 31—36

Поступила в редакцию 08.11.17.

После доработки 05.09.18.

Принята к публикации 10.09.18.

Vaitekhovich P. E. A Combined Model of Abrasive Wear of the Blades of the Rotor-Accelerator Centrifugal Mill.

The proposed combined model calculates the intensity of abrasion of rotor blades of the centrifugal accelerator of the mill. It includes the definition of impact velocity and angle of attack of the particles, calculation of impact-abrasive wear, definition of the velocity of the particle along the blade and calculation of the abrasive wear under the impact. It is established that wear by abrasion is 1.5 times lower than at impact. The adequacy of the combined model confirmed a good convergence of the calculation results with the experimental data.

Keywords: abrasive particle motion, speed of impact, angle of attack, intensity of wear, pressure, segment penetration, area of the slice.