

УДК 621.926.4

УДАРНО-АБРАЗИВНОЕ ИЗНАШИВАНИЕ ЛОПАСТЕЙ РОТОРА ЦЕНТРОБЕЖНОЙ МЕЛЬНИЦЫ

д-р техн. наук, доц. П.Е. ВАЙТЕХОВИЧ

(Белорусский государственный технологический университет, Минск)

Проведен анализ абразивного износа лопастей ротора-ускорителя центробежной мельницы. В качестве расчетной принята модель Бекмана – Гоцмана, которая базируется на ударном воздействии абразивных частиц с металлической поверхностью лопастей. Установлено, что основными параметрами, влияющими на износ, являются скорость и угол атаки в момент соударения. Для определения указанных параметров составлена математическая модель движения частиц измельчаемого материала по поверхности диска. Решение задачи заключалось в построении траектории движения частиц до их соприкосновения с лопастями, при котором фиксировалась скорость и угол. С использованием скорости удара и угла атаки определена объёмная интенсивность износа.

Ключевые слова: центробежная мельница, ротор-ускоритель, лопасти, ударно-абразивное изнашивание.

Введение. Измельчители ударного действия, в том числе и ударно-центробежные, широко используются во многих отраслях промышленности. Их основные преимущества – простота конструкции, высокая степень измельчения, относительно низкие энергозатраты на проведение процесса. Ударные измельчители относятся к быстроходным агрегатам, которые характеризуются высокой интенсивностью взаимодействия с обрабатываемым материалом. С точки зрения повышения эффективности измельчения – это положительный факт, но одновременно каждый контакт абразивного материала с рабочим органом неизбежно приводит к его износу.

Износ как уменьшение массы, объема в большинстве агрегатов представляет больше экономическую, чем техническую проблему. Так, в тихоходных измельчителях, таких как барабанная (шаровая) мельница, износ на порядок выше, чем в ударных, по мере износа добавляется определенное количество измельчающих тел, и ресурс безостановочной работы исчисляется месяцами и годами. В ударных мельницах неравномерный износ нарушает балансировку быстровращающегося ротора. В результате возникают большие инерционные силы, создающие биения, вибрацию, что приводит к быстрому износу шеек валов, разрушению подшипников и конструкции агрегата в целом. По этой причине ресурс работы ударной мельницы между заменой ударных элементов ограничивается сотнями часов.

Всё сказанное выше свидетельствует о том, что при разработке и эксплуатации измельчителей ударного действия вопросам износостойкости необходимо уделять большое внимание. Это в полной мере относится и к ударно-центробежным мельницам, и дробилкам, выпускаемым в Беларуси [1].

Очевидно, что для успешного решения обозначенных проблем следует глубоко изучить физическую сущность *процесса износа*. Приоритет в этом направлении принадлежит советскому специалисту И.В. Крагельскому [2]. Но наиболее основательно износ в измельчителях ударного действия изучал И.Р. Клейс [3]. Он провел анализ большого количества работ по исследованию абразивного износа этих агрегатов, отметил основные факторы, влияющие на его интенсивность, дал критическую оценку расчетных моделей этого процесса. Преобладающая часть рассмотренных моделей основана на ударном воздействии абразивных частиц с металлической поверхностью рабочих органов машин. Среди них по глубине проработки, учёту максимального количества факторов отличается модель износа Бекмана – Гоцмана [4]. Эта модель начала широко использоваться многими специалистами, в том числе и Крагельским [5]. В связи с этим при разработке метода расчета абразивного износа лопастей ротора-ускорителя центробежной мельницы будем руководствоваться именно этой моделью.

Основная часть. Сущность модели Бекмана – Гоцмана заключается в том, что при ударе частицы о поверхность на ней образуется лунка (рисунок 1).

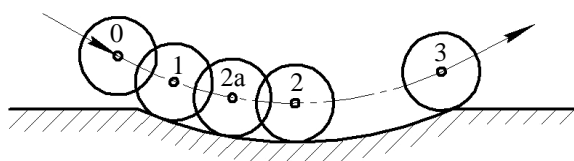


Рисунок 1. – Схема контактирования частицы с поверхностью

Когда частица проникает в основное тело, её центр перемещается по криволинейной траектории, которую можно разделить на несколько участков: 0–1 – *упругая деформация* с возможным восстановлением;

1–2а – пластическая деформация, когда частица совершает только деформационную работу; 2а–2 – пластическая деформация с энергией деформирования и трения – начало удаления продукта износа.

На этих стадиях в результате пластической деформации локальная температура металла достигает температуры плавления. В точке «2» частица полностью теряет свою нормальную составляющую скорости и продолжает перемещаться за счет касательной. При этом на участке 2–3 частица совершает работу деформации, сопровождаемую сдвигом слоев и выносом расплавленного металла из лунки.

В работе [4], как и большинству других [2; 3], в качестве основной характеристики абразивного изнашивания поверхности принята объемная интенсивность износа:

$$W = \frac{\Delta V}{m}, \frac{\text{мм}^3}{\text{кг}}, \quad (1)$$

где ΔV – уменьшение объема образца за время опыта, $\text{мм}^3/\text{с}$; m – масса абразива, ударившегося об образец за это время, $\text{кг}/\text{с}$.

Из физической модели Бекмана – Гогмана ясно, что механизм удаления из лунки продукта изнашивания на стадиях 2а–2 и 2–3 разный. Поэтому формула, предложенная ими для расчета объемной интенсивности износа, включает два слагаемых, каждое из которых соответствует определенной стадии:

$$W = \frac{3}{4\pi\rho_c e_s^*} (\tau_{s1} I_1 + \tau_{s2} I_2), \quad (2)$$

где ρ_c – плотность среды (абразива), $\text{кг}/\text{м}^3$; e_s^* – плотность энергии среза, $\text{Дж}/\text{м}^3$; τ_{s1} и τ_{s2} – прочность адгезионных связей на срез для соответствующих стадий, Па ; I_1 и I_2 – параметры, характеризующие изменение поверхности при срезе, отнесенной к объёму частицы, $\text{м}^2/\text{м}^3$.

Заметим, что первое слагаемое в уравнении (2) отражает деформационный (хрупкий), а второе – пластический износ.

Авторами в работе [4] представлен развернутый вариант математического описания модели износа, где приведены формулы для расчета всех параметров, входящих в уравнение (2). Большинство из них зависит от глубины лунки. Вместе с тем для изнашиваемых поверхностей, выполненных из материалов с высоким модулем упругости и высокой плотностью, что характерно для всех конструкционных металлов, предложена упрощенная модель и ее математический аппарат.

Для расчета износа по этой модели вводится дополнительный параметр

$$\varphi = \nu \left(\frac{2\rho_c}{3HB} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

где ν – скорость частицы в момент удара, $\text{м}/\text{с}$; HB – твердость поверхности металла, Па .

С использованием этого параметра определяются все остальные, входящие в уравнение (2).

Так, прочность адгезионных связей

$$\tau_{s1} = \tau_0 + \left(\frac{\varphi \sin \alpha}{2} \right)^{1/2} HB, \quad (4)$$

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

где α – угол атаки при ударе; τ_0 – прочность адгезионных связей на срез при отсутствии силы давления.

Величина τ_0 является характеристикой материала, из которого изготовлен изнашиваемый узел. Для материалов с основным компонентом в качестве железа $\tau_0 = 1320 \text{ МПа}$.

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

$$I_1 = 6,81\varphi^{5/2} \cos^2 \alpha \cdot \sin^{1/2} \alpha, \quad (6)$$

$$I_2 = 0,65\varphi^2 \cdot \sin^2 \alpha, \quad (7)$$

Оставшаяся неопределенной в уравнении (2) плотность энергии среза – это тоже константа изнашиваемого материала. Её можно определить по формуле:

$$e_s^* = k_1 L \rho_m, \quad (8)$$

где ρ_m – плотность металла; L – теплота плавления металла; k_1 – эмпирический коэффициент, который определяется по номограмме [4].

Для материала Ст. 3 $e_s^* = 46500 \text{ МПа}$.

Из всех расчетных зависимостей (3)–(7) видно, что основными параметрами, влияющими на износ, являются угол атаки α и скорость v абразивных частиц в момент удара.

Определение указанных параметров – это отдельная задача механики движения частиц по вращающемуся диску. Исходя из опыта решения подобных задач [6], непосредственно для ударно-центробежной мельницы алгоритм решения такой задачи представлен в одной из последних работ [7].

Ротор-ускоритель ударно-центробежных мельниц включает диск, на котором укреплены лопасти [1]. Схема установки лопастей может быть различной. Так, прямолинейные лопасти могут укрепляться радиально и тангенциально, причем тангенциальное расположение реализуется обычно в двух вариантах: повернутых вперед по ходу вращения ротора и назад против него.

Центральная зона диска служит для равномерного распределения материала. В отдельных случаях здесь устанавливается конус-распределитель.

Частицы материала на выходе из зоны распределения находятся в разных точках 1–3 (рисунок 2) сектора, образованного соседними лопастями. Естественно, что траектории движения по диску у них тоже будут разными. Ближайшие частицы будут сразу прижиматься к лопастям и передвигаться вдоль их со скольжением [8]. При увеличении начального угла расположения частиц они пройдут некоторое расстояние по диску, ударятся о лопасть и продолжат движение вдоль нее.

Траектория перемещения частиц и необходимые значения скорости соударения и угла атаки определялись [7] с использованием уравнения относительного движения:

$$m\overline{a}_d = \overline{F}_m + \overline{F}_e + \overline{F}_c, \quad (9)$$

где a_d – ускорение относительного движения, м/с²; F_m – сила трения, Н; F_e , F_c – инерционные переносная и кориолисова силы, Н.

Решение этой задачи рассмотрим на примере ротора с радиальными лопастями (рисунок 2).

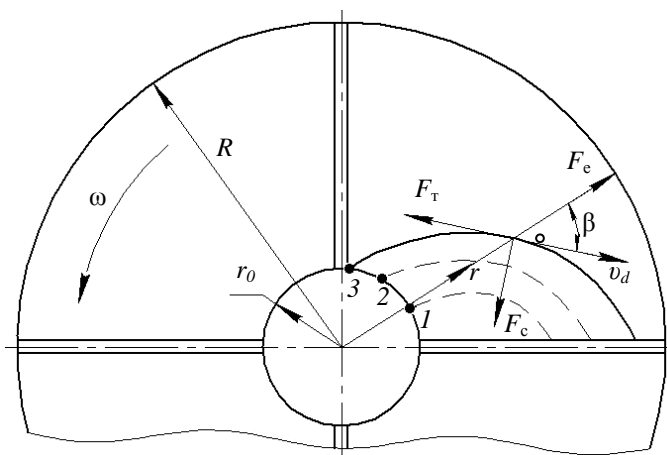


Рисунок 2. – Расчетная схема для определения траектории движения частиц

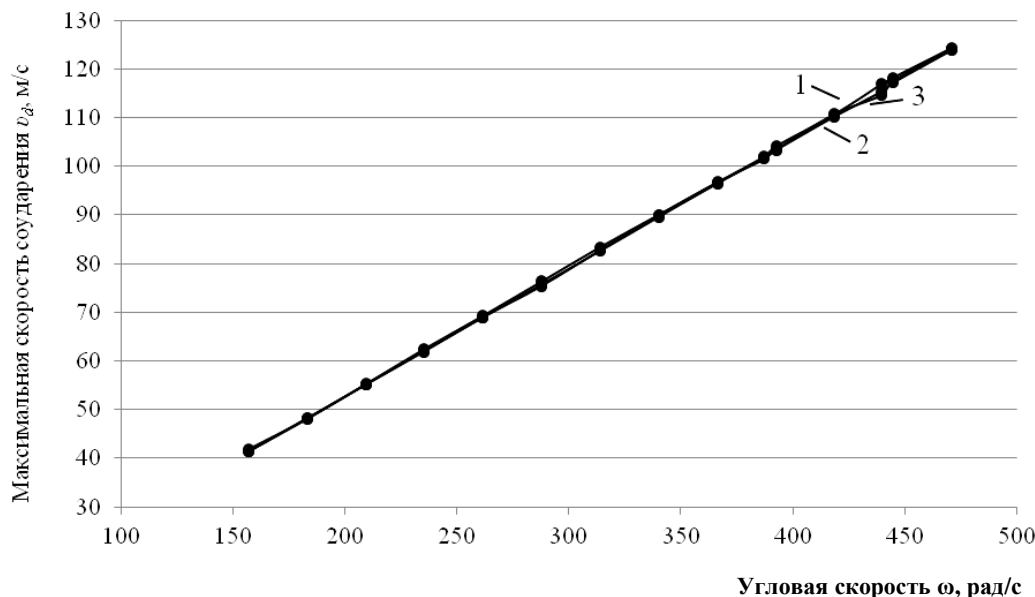
Уравнения движения в проекциях на оси полярной системы координат имеют вид:

$$\begin{cases} \ddot{r} - r(\ddot{\phi})^2 = -fg \frac{\dot{r}}{\sqrt{(\dot{r})^2 + (r\dot{\phi})^2}} - 2\omega r\dot{\phi} + \omega^2 r; \\ r\ddot{\phi} + 2\dot{r}\dot{\phi} = -fg \frac{\dot{r}}{\sqrt{(\dot{r})^2 + (r\dot{\phi})^2}} + 2\omega\dot{r}, \end{cases} \quad (10)$$

где r , \dot{r} , \ddot{r} – радиальная координата и ее производные; ϕ , $\dot{\phi}$, $\ddot{\phi}$ – угловая координата и ее производные; f – коэффициент трения частиц по диску; ω – угловая скорость ротора.

Расчет по уравнениям (10) проводился для ротора радиусом $R = 230$ мм, начальным радиусом установки лопастей $R_0 = 80$ мм в диапазоне угловых скоростей $\omega = 150 \dots 470$ рад/с. Начальный угол расположения частиц в межлопастном пространстве (см. рисунок 2) принимался 30, 60, 90 град.

Для определения износа важна максимальная скорость соударения, которая будет достигаться при начальном расположении частицы на наибольшем удалении от лопасти, характеризуемом углом 90 град (точка 3, см. рисунок 2). Её изменение в зависимости от угловой скорости для всех трех схем расположения лопастей показано на рисунке 3.



1 – радиальные; 2 – повернутые вперед; 3 – повернутые назад

Рисунок 3. – Зависимость скорости соударения от угловой скорости ротора

Для всех схем установки лопастей относительная скорость при указанном начальном угле в исследуемом диапазоне угловых скоростей изменяется в пределах 41...124 м/с.

Для разных схем установки лопастей её значения отличаются не более чем на 1,0 м/с, что на графике при выбранном масштабе преобразовалось в одну линию (см. рисунок 3).

Радиус контакта частиц с лопастями практически не зависит от угловой скорости ротора, а определяется только их начальным расположением. В общем случае ударное воздействие частиц на лопасти происходит по всей их длине. Контакт наиболее удаленной в начальный момент частицы с радиальной лопастью осуществляется на радиусе 172 мм, с повернутой вперед – 186 мм. Далее они движутся направленно вдоль лопасти. В конструкции ротора с лопастями, повернутыми назад, контакт частиц с ними достигается только при низких угловых скоростях – до 235 рад/с. При дальнейшем увеличении угловых скоростей они вылетают из ротора без соударения с лопастями. В этой связи третья конструктивная схема с точки зрения ударно-абразивного износа не представляет большого интереса.

Угол атаки частиц увеличивается вместе с первоначальным отдалением их от лопасти на 23...31 град, но не изменяется при повышении угловой скорости ротора с радиальными лопастями. Идентично его изменение и при повороте лопасти вперед по ходу вращения. Только диапазон изменения угла при этом составляет 56...76 град.

Для первых двух конструктивных схем с уменьшением начального угла расположения частицы уменьшаются все выходные параметры: скорость соударения, угол атаки. Следует ожидать, что при этом будет уменьшаться и интенсивность износа.

Для подтверждения сказанного предположения проведем её расчет по уравнениям (2)...(7). Примем недостающие для расчета параметры: плотность кварцевого песка – $\rho_c = 2640 \text{ кг/м}^3$; твердость стали Ст 3 – $HV = 1300 \text{ МПа}$.

Результаты расчета для ротора с радиальными лопастями представлены на рисунке 4 в виде графической зависимости $W = f(\omega)$, из которой видно, что при увеличении угловой скорости вместе с ростом относительной скорости (см. рисунок 3) повышается и абразивный износ. Например, при начальном угле расположения частиц, равном 90 град, он максимален и изменяется в пределах 61...100 мм³/кг. Приближение частицы к лопасти в начальный момент (30 и 60 град) ведет к снижению скорости соударения, а соответственно и к интенсивности износа.

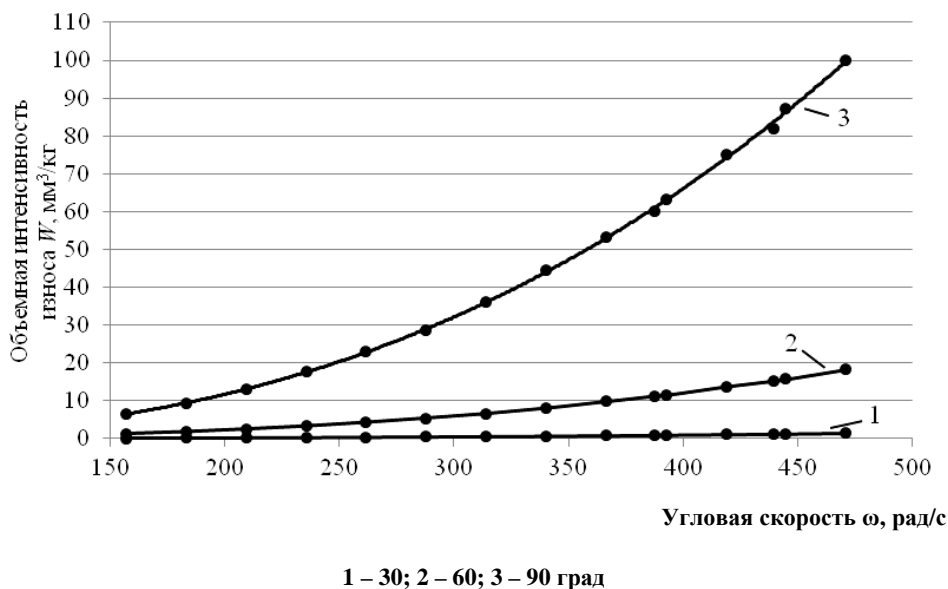


Рисунок 4. – Зависимость объемной интенсивности износа от угловых скоростей ротора

Сравнение двух первых конструкций роторов по величине интенсивности износа при начальном угле атаки $\alpha = 90$ град показывает (рисунок 5), что при повороте лопастей вперед по ходу вращения он несколько ниже.

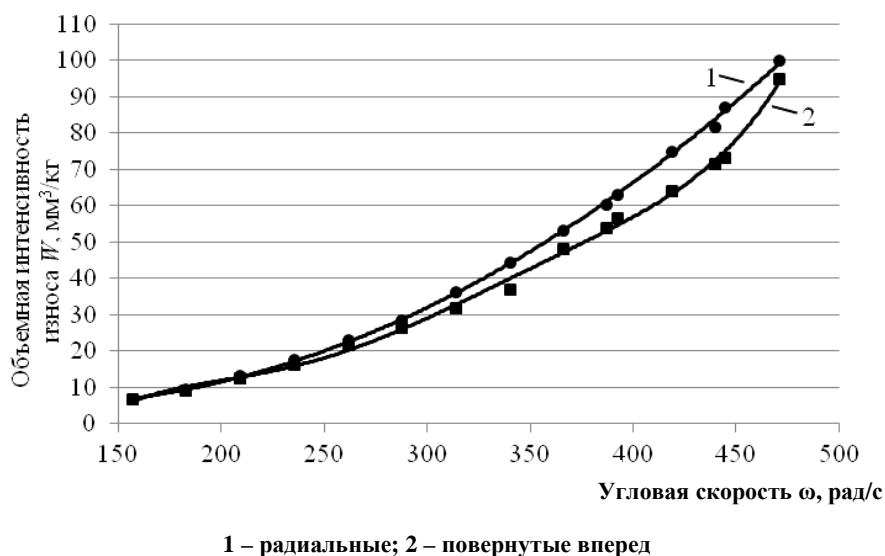


Рисунок 5. – Сравнение конструктивных вариантов роторов по интенсивности износа

Следует отметить, что величина интенсивности износа, рассчитанного по предлагаемой методике, меньше полученного экспериментальным путем [9]. Скорее всего, это обусловлено дополнительным износом за счет истирающего эффекта при движении частиц после соударения вдоль лопасти. Последнее говорит о необходимости дальнейшего совершенствования модели расчета абразивного износа лопастей с учетом истирания.

Заключение. Работа посвящена созданию методики расчета абразивного износа лопастей ротора-ускорителя центробежной мельницы. На основе анализа методик расчета интенсивности износа для этого агрегата за базовый вариант принята модель Бекмана – Гоцмана с её математическим описанием, которая заключается в учете ударного воздействия абразивных частиц с металлической поверхностью.

Установлено, что определяющими факторами, влияющими на величину износа, являются скорости соударения частиц с поверхностью и угол атаки.

Рассмотрен и реализован метод определения этих параметров при соударении частиц с лопастями ротора, основанный на решении дифференциальных уравнений при их движении в межлопастном про-

странстве. По полученным значениям скорости и угла атаки рассчитана интенсивность износа лопастей для трех конструктивных вариантов, отличающихся схемой их установки. Сравнение экспериментальных и расчетных данных износа показало, что величина последнего несколько меньше.

Таким образом, можно сделать вывод о необходимости совершенствования методики расчета интенсивности износа в направлении дополнительного учета истирающего эффекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бароха, Э.Л. Центробежные дробилки и мельницы ударного типа / Э.Л. Бароха, В.В. Воробьев, А.В. Горобец // Центробежная техника – высокие технологии : материалы 3-й междунар. науч.-техн. конф. ; ОАО «НПО Центр». – Минск, 2008. – С. 5–15.
2. Крагельский, И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – М. : Машиностроение, 1968. – 480 с.
3. Клейс, И.Р. Износостойкость элементов измельчителей ударного действия / И.Р. Клейс, Х.Х. Ууэймыс. – М. : Машиностроение, 1986. – 286 с.
4. Beckmann, G. Analytical model of the blast wear intensity of metal based on a general arrangement for abrasive wear / G. Beckmann, J. Gotzmann // Wear. – 1981. – Vol. 73. – P. 325–353.
5. Kragelsky, I.V. Theory of material wear by solid particle impact – a review / I.V. Kragelsky, A.I. Zolotar, A.O. Sheiwekhman // Tribology international. – 1985. – Vol. 18, № 1. – P. 3–11.
6. Вайтехович, П.Е. Интенсификация и моделирование процессов диспергирования в поле инерционных сил / П.Е. Вайтехович. – Минск : БГТУ, 2008. – 220 с.
7. Вайтехович, П.Е. Модель движения материала в роторе-ускорителе центробежно-ударной дробилки / П.Е. Вайтехович, П.С. Гребенчук, А.В. Таболич // Труды БГТУ. Химия и технология неорганических веществ. – 2014. – № 3. – С. 102–105.
8. Влияние конструктивных особенностей ротора на скорость измельчаемого материала в центробежно-ударных дробилках / П.Е. Вайтехович [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2017. – № 2. – С. 54–63.
9. Таболич, А.В. Конструкционные возможности повышения износостойкости ускорителей центробежно-ударных мельниц / А.В. Таболич, С.Н. Бондаренко // Горная механика и машиностроение. – 2016. – № 2. – С. 71–77.

Поступила 20.11.2017

SHOCK – ABRASIVE WEAR OF ROTOR BLADES CENTRIFUGAL MILL

P. VAYTEKHOVICH

The analysis of abrasive wear of the blades of the rotor-accelerator centrifugal mill is given. As a design a model Beckman – Gotsman is adopted, this model is based on the impact of abrasive particles with the metal surface of the blades. It is established, that the main parameters affecting wear are the speed and angle of attack at the moment of impact. For the definition of these parameters a mathematical model of motion of particles of crushed material on the surface of the disk. The solution to the problem was to build the trajectory of the particles prior to their contact with the blades, wherein the fixed speed and angle. Using the impact velocity and angle of attack determined volumetric wear intensity.

Keywords: centrifugal mill, rotor-accelerator, blades, shock-abrasive wear.