

Д.А. Власенко, Э.П. Левченко /к.т.н./, Г.А. Билан
ГОУ ВПО «Донбасский государственный технический университет» (Алчевск)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ МОЛОТКОВ ПРИ ДРОБЛЕНИИ МАТЕРИАЛА СВОБОДНЫМ УДАРОМ

На основании изучения кинематики молотка при свободном ударе и формулы Финни разработана математическая модель изнашивания бил в молотковой дробилке. На базе опытных данных получены регрессионные модели изнашивания ударных органов при измельчении известняка. В результате выявлено влияние массы молотков на их износ при ударном контакте.

Ключевые слова: молотковая дробилка, молоток, известняк, изнашивание, эрозионный износ.

Постановка проблемы

В настоящее время общий металлофонд технологических машин и металлургического оборудования выражается в миллиардах тонн, при этом большинство их рабочих деталей и узлов подвергаются интенсивному абразивному износу.

В metallurgической отрасли затраты на изготовление запасных частей составляют сотни миллионов рублей, а металл на их производство тратится гораздо больше, чем на производство новых машин, агрегатов и технологического оборудования. Складывается ситуация, когда в связи с относительно невысоким сроком службы затраты на замену сменного оборудования, техническое обслуживание (ТО) и различные ремонты за период эксплуатации в несколько раз превышают их первоначальную стоимость.

Современные тенденции развития, связанные с повышением надежности, эффективности эксплуатации и производительности оборудования предприятий черной металлургии на первый план выдвигают проблему повышения их долговечности и износостойкости в ряд важнейших задач народно-хозяйственного значения. Срок службы технологического оборудования остается недостаточным, при этом значительный износ деталей рабочих органов наблюдается в агрегатах, эксплуатируемых в ударно-абразивной и агрессивной средах.

Анализ последних исследований и публикаций

Одним из самых металлоемких видов оборудования являются дробильные машины и измельчители, в частности молотковые дробилки. Из опыта работы металлургических предприятий известно, что срок службы отдельных их рабочих органов в зависимости от свойств перерабатываемого материала не превышает 500 часов [1,2].

Решению проблем повышения эффективности работы, надежности и долговечности отдельных узлов и деталей дробильных машин посвящено множество работ, в которых указывается, что процесс измельчения характеризуется множеством факторов. Установлено, что одним из наиболее важных рабочих органов, влияющих на показатели работы дробилки, являются молотки, в частности, их форма, схема и способ установки на оси подвеса ротора, расстояние от концов молотков до поверхности решетки, степень износа и т.д.

Вопросами износа ударных рабочих органов занимались А.А. Петров, В.Н. Савченко, которые предложили методики по определению удельного износа ударных элементов от времени, замера интенсивности нарастания износа контактной части молотка, геометрической формы износа молотков дробилок для дальнейшего обоснования локального упрочнения участков рабочей поверхности молотка [3,4].

В ряде работ были получены зависимости удельного износа ударных органов различных типов дробилок. Так, В.В. Гоева и М.Ю. Колобов, анализируя аналогичные процессы, рассмотрели износ последней ступени молотка ступенчатой формы и предложили формулы по определению изнашивания молотков от количества переработанного материала, скорости движения рабочих органов, однако они не учитывали физико-механические свойства дробимого продукта [5,6].

Данные зависимости не в полной мере учитывают влияние такого фактора, характеризующего процесс дробления, как отклонение бил при соударении с частицей материала, и рассматривают износ поверхности как абразивный или усталостный механический, возникающий при скольжении частицы после ударного взаимодействия. Для определения интенсивности

износа ими была использована гипотеза Престона [7].

Таким образом, вопросы взаимодействия ударных элементов с дробимым материалом и условия работы молотка изучены пока еще не в полной мере. Некоторые предположения и их результаты носят достаточно противоречивый характер. Прогнозированию ресурса молотков и изучению их износа уделялось недостаточно внимания. Все это указывает на необходимость продолжения исследований, направленных на повышение эффективности использования молотковых дробилок при переработке различных материалов.

Цель (задачи) исследования

Задачами данного исследования являются разработка математической модели процесса изнашивания молотков на этапе их ударного взаимодействия с частицей материала, а также изучение влияния основных физико-технологических параметров процесса дробления материала в молотковой дробилке на износ ударных органов при фракционной подготовке известняка в условиях агломерационного цеха Филиала № 12 «Алчевский металлургический комбинат» ЗАО «Внешторгсервис» при неподвижном [8] и шарнирном способах установки молотков на оси подвеса ротора.

Основной материал исследования

Определение напряжений, возникающих при взаимном контакте материала с поверхностью молотка, с учетом трения, износа и разрушения представляет собой сложную математическую проблему. Описание данных процессов представляет собой отдельную составляющую задачу, не входящую в цели исследования. Поэтому для решения поставленных задач нахождения параметров взаимного контакта тел используем положения прикладной теории удара, делая допущения, дающие возможность построить модель, с помощью которой удастся получить как качественные, так и количественные оценки.

На основные показатели работы дробилки оказывают влияние режим работы (скорость и время обработки сырья), характеристика измельчаемого материала (абразивность, твердость, исходная фракция), форма, физико-химические свойства и способ упрочнения поверхности молотка. Также существенное значение имеют кинематические показатели процесса взаимодействия частицы с молотком (глубина внедрения материала в рабочую зону молотков s и угол отклонения рабочего органа в процессе ударного контакта).

На этапе соударения куски материала можно представить как макротело, состоящее из отдельных абразивных микрочастиц, образующихся в процессе измельчения. Из этих условий на основании анализа параметров кинематики молотка и материала [2], а также условий их контактного взаимодействия можно предположить, что в данном случае происходит эрозионный износ, возникающий при многочисленных ударных контактах частиц о рабочую поверхность ударного органа [9,10].

В статической теории удара Герца [11] относительная скорость тел при соударении равна нулю, и центр соударения (точка A) остается неподвижным (рис. 1). В случае использования данной теории в условиях ударного контакта молотка и частицы материала ротор рассматривается как система, состоящая из двух взаимосвязанных шарниров, вращающихся относительно центров вращения (рабочая зона молотков с радиусом вращения r и оси подвеса молотков с радиусом подвеса R).

Рассмотрим задачу, описывающую удар частицы материала по молотку. В этом случае он отклоняется на угол, определяющийся по формуле [2]:

$$\gamma = \left(1 + \frac{R}{r - c}\right) \frac{4}{(k_m + 1) \sqrt{\frac{(r - c)(R + r - c)}{r_u^2}}}, \quad (1)$$

где k_m – коэффициент отношения массы молотков, участвующих в ударном контакте, $m_{\Sigma m}$, к массе частицы материала m_u ; r_u – радиус инерции бил относительно оси подвеса.

В этом случае угол между векторами линейных скоростей точки контакта на поверхности молотка в начальной и конечной стадии соударения можно считать углом атаки частицы, а объем изношенного материала молотка эмпирической зависимостью, основанной на формуле Финни (для углов атаки менее $18,5^\circ$) [12]:

$$V = \frac{v_y^2}{24k_\sigma \sigma_m} \cos^2(90 - \gamma) \Rightarrow \frac{v_y^2}{24k_\sigma \sigma_m} \sin^2 \gamma, \quad (2)$$

где V – объем изношенного материала, приходящийся на 1 кг дробимого продукта; v_y – скорость атаки (линейная скорость молотка в конечной стадии соударения) [13]; k_σ – эмпирический коэффициент предела прочности материала молотка при ударе; σ_m – теоретическое значение предела прочности материала молотка.

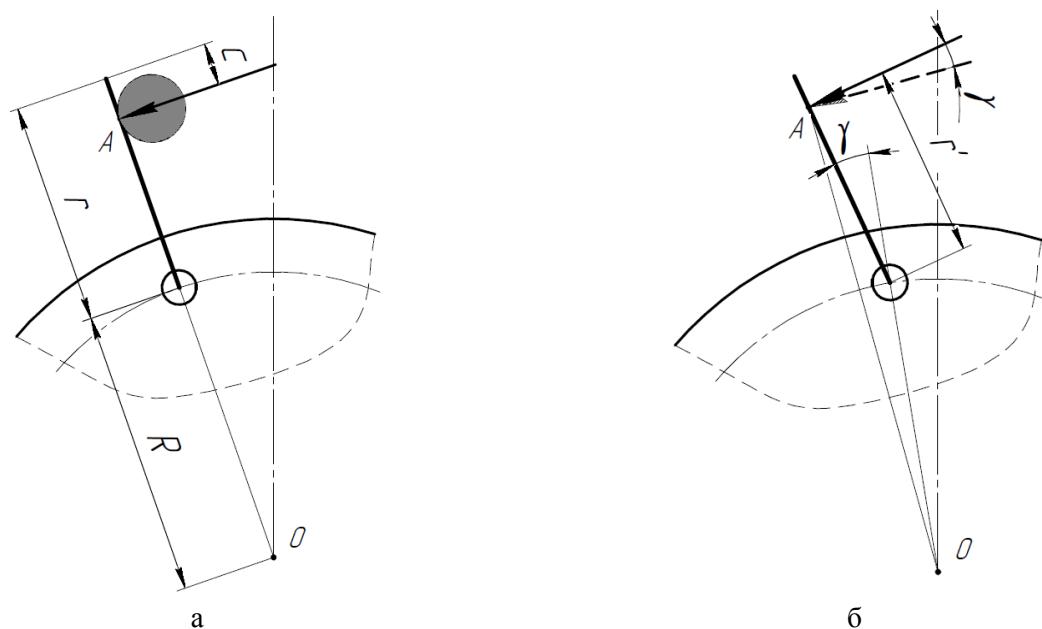


Рис. 1. Расчетная схема для определения угла атаки частиц в момент соударения с молотком:
а – в начальной стадии удара; б – в конечной стадии удара

С учетом выражения (1) и скорости v_y объем изношенного материала на стадии ударного контакта молотков с дробимым материалом при его внедрении в рабочую зону дробилки будет определяться по формуле:

$$V_M = \frac{4\pi M \rho \omega r_u^2 (k_m - 1)^2 (R - c + r)^3}{3\sigma_m k_\sigma z (r - c)^3 (k_m + 1)^4}, \quad (3)$$

где M – масса измельчаемого материала в дро-

билке; ρ – плотность материала молотка; ω – угловая скорость вращения ротора дробилки; z – количество рядов молотков, установленных на роторе.

С целью подтверждения теоретических предположений и изучения процесса изнашивания ударных органов применялась молотковая дробилка ДМРиЭ 14,5×13 без колосниковой решетки (рис. 2) в промышленных условиях производства агломерационного Филиала № 12 «Алчевский металлургический комбинат» ЗАО «Внешторгсервис».



Рис. 2. Общий вид молотковой дробилки ДМРиЭ 14,5×13
в условиях агломерационного цеха Филиала № 12 «Алчевский металлургический комбинат»
ЗАО «Внешторгсервис»

В ходе производственного эксперимента проводились промышленные испытания дробильного комплекса агломерационных флюсов. При этом использовались обычный шарнирный (рис. 3а) и новый предложенный комбинированный способ подвеса молотков на оси (рис. 3б), при котором все молотки на оси подвеса крепятся неподвижно, а сама ось в отверстиях ротора установлена шарнирно.

Технико-эксплуатационные характеристики дробилки при проведении опытов: угловая скорость вращения ротора – $78,5 \text{ с}^{-1}$; масса нового молотка – 17,07 кг; радиус подвеса молотка – 0,43 м; расстояние от оси подвеса до внешней грани ударной части молотка – 0,295 м; теоретическая глубина внедрения частицы материала в рабочую зону – 0,068 м; количество молотков на оси – 12; количество рядов молотков на роторе – 5; теоретическое значение предела прочности материала молотка – 450 МПа. В качестве сырья использовался доменный известняк фракцией 40...100 мм, насыпной плотностью $2800 \text{ кг}/\text{м}^3$ и влажностью 4...8 %.

Для проведения многофакторного эксперимента применялось центральное композиционное ротатабельное унiformпланирование второго порядка [14]. В качестве основных факторов, определяющих износ молотков при дроблении известняка, выбирались:

- масса молотков, соударяющихся с частицей массой $m_{\Sigma m}$;
- средняя масса m_u частиц флюсов, поступающих на дробление.

Необходимая масса молотков для проведения экспериментов обеспечивалась за счет определенного количества жестко закрепленных молотков новой конструкции на каждой оси подвеса, остальные молотки устанавливались шарнирно (использовалась типовая конструкция). Для моделирования функции износа требовался интервал варьирования фактора массы молотков, находящийся в непосредственной близости к нижней звездной точке, так как при больших коэффициентах масс k_m угол отклонения стремится к нулю. Для этого использовались изношенные с одной стороны молотки (после эксплуатации без реверса), массой близкой к 13 кг. При комбинированном с молотками новой конструкции задавались необходимые уровни в матрице планирования (табл. 1). Среднее отклонение от необходимого уровня составило порядка 1 %.

Для определения степени износа молотков для каждой из комбинаций факторов согласно матрице планирования (табл. 1) после дробления 500 тонн известняка оборудование останавливалось, молотки фотографировали без демонтажа и методом профилографирования определяли профиль и массу изношенной части бойка (рис. 4).

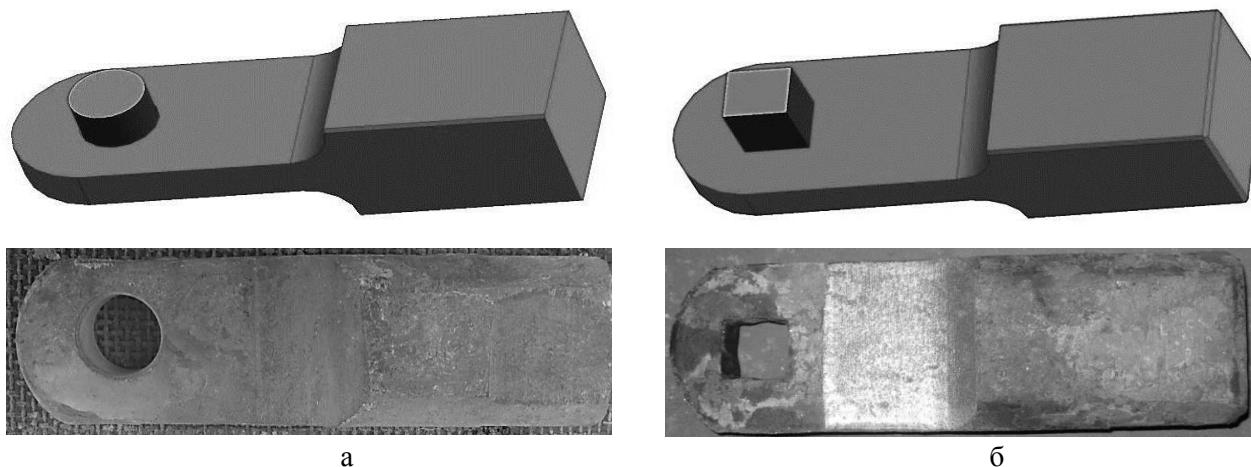


Рис. 3. Трехмерная модель и внешний вид молотков:

a – с шарнирным способом крепления; *b* – с комбинированным способом крепления

Табл. 1. Интервалы варьирования факторов для модели износа молотков

Параметр	$x_1(m_{\Sigma m})$, кг	$x_2(m_u)$, кг
Основной уровень, $x_i=0$	26,4	0,16
Интервал варьирования, I	9,33	-0,011
Верхний уровень, $x_i=+1$	35,73	0,05
Нижний уровень, $x_i=-1$	17,07	0,27
Верхняя звездная точка, $x_i=+1,414$	39,6	0,32
Нижняя звездная точка, $x_i=-1,414$	13,2	$4,02 \times 10^{-3}$



Рис. 4. Профилографирование износа молотков

После переработки 2000 тонн известняка молотки демонтировали, и проводилось взвешивание каждого из них на механических весах. Затем производился обратный монтаж молотков и повторное испытание. Число опытов для каждой комбинации молотков старой и новой конструкции принималось равным трем.

При проведении повторных экспериментов в процессе эксплуатации молотковой дробилки получены следующие значения износа молотков (табл. 2).

Коэффициенты регрессии находили по формулам [14]. Проверка воспроизводимости эксперимента проводилась по критерию Кохрена.

После определения значимости коэффициентов по критерию Стьюдента получена адекватная регрессионная зависимость:

$$y_2(x_1, x_2) = -0,035x_1 - 0,054x_2 + 0,022x_1^2 - 8,377 \cdot 10^{-3} x_2^2 + 0,024x_1x_2 + 0,148. \quad (4)$$

Адекватность модели подтверждалась по критерию Фишера [17].

В раскодированном (натуральном) виде математическая модель износа молотков выглядит как:

$$\begin{aligned} V_{\text{ЭМ}} = & 0,737m_q^2 - 0,025m_q m_{\Sigma_M} + \\ & + 0,924m_q + 2,519 \cdot 10^{-4} m_{\Sigma_M}^2 - \\ & - 0,013m_{\Sigma_M} + 0,263. \end{aligned} \quad (5)$$

Для определения поправочного коэффициента при определении предела прочности материала молотка при ударе сопоставим результаты, полученные по формуле (3) (с коэффициентом $k_o=1$), и значения массы изношенного материала молотка при экспериментальном измельчении флюса (фактический износ молотка определяем по формуле (4)) при различных комбинациях двух факторов (табл. 3).

Табл. 2. Показатели износа молотков согласно матрице планирования

№ опыта	Показатель износа при различных уровнях матрицы планирования, кг/2000 т												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0,29	0,18	0,12	0,11	0,26	0,14	0,23	0,11	0,17	0,15	0,14	0,14	0,15
2	0,29	0,18	0,12	0,1	0,25	0,14	0,24	0,10	0,17	0,15	0,14	0,14	0,15
3	0,29	0,18	0,12	0,11	0,26	0,14	0,24	0,10	0,16	0,14	0,14	0,15	0,14

Табл. 3. Экспериментальные и теоретические значения величины износа

Показатель	Износ молотков при различных уровнях матрицы планирования, кг/2000 т									Среднее значение k_o
	1	2	3	4	5	6	7	8	9...13	
$V_{\text{ЭМ}}$	0,29	0,17	0,14	0,12	0,24	0,14	0,24	0,09	0,15	
V_M	0,052	0,031	0,024	0,022	0,041	0,025	0,041	0,022	0,029	
k_o	5,6	5,6	5,6	5,1	5,8	5,7	5,9	4,1	5,2	5,348

Эмпирический коэффициент для определения предела прочности молотка при ударе определяется по формуле:

$$k_{\sigma} = \sum \frac{V_{\Sigma \sigma i}}{V_{\Sigma m j}} \cdot N^{-1} \quad (6)$$

Опытный коэффициент при дроблении известняка составил $k_{\sigma}=5,348$.

Отклонение теоретических результатов от опытных значений, полученных при экспериментальных исследованиях в промышленных условиях, не превысило 12,6 %, что подтверждает достоверность предложенных теоретических методов по определению износа молотков в процессе диспергирования материалов в горизонтальной молотковой дробилке.

Для наглядного отображения адекватности формулы (3) и опытных данных (определенных с помощью регрессионной модели (5) построены графики поверхностей (рис. 5), отображающие зависимости величин износа молотков от их массы в ряду и массы частиц известняка.

На практике использовать различное количество жестко закрепленных молотков на оси подвеса нецелесообразно, так как это усложняет техническое обслуживание дробилки (балансировку ротора, замену вышедших из строя молотков). Для эксплуатации рекомендуется использовать полную навеску молотков комбинированной конструкции (для условий ДМРиЭ 14,5×13 – 12 шт.).

На рис. 6 показаны графики зависимостей износа молотков от массы фракции известняка при шарнирном и комбинированном способах установки всех молотков на оси подвеса. Из анализа данных зависимостей видно, что при комбинированном способе крепления молотков на оси подвеса ротора износ на начальной стадии эксплуатации молотков значительно меньше.

В процессе эксплуатации дробилки в штатном режиме (с колосниковой решеткой) в течение 90 суток установлено, что при использовании предложенной конструкции крепления молотков наблюдается снижение среднего значения износа ударных рабочих узлов за счет уменьшения истирания при ударном контакте с материалом от $0,413$ до $0,379 \cdot 10^{-4}$ кг/т.

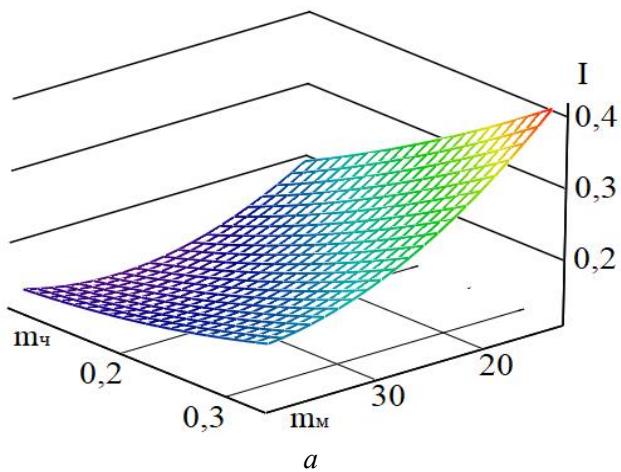


Рис. 5. Графики зависимостей износа молотков:
а – экспериментальная; б – теоретическая

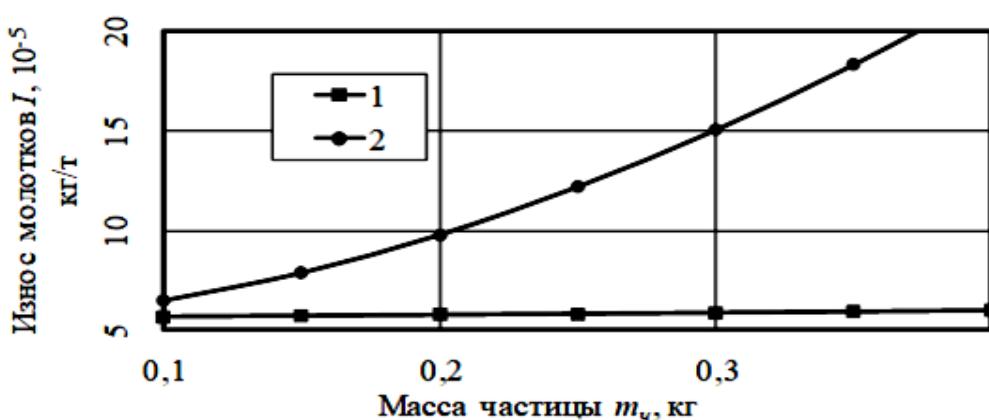
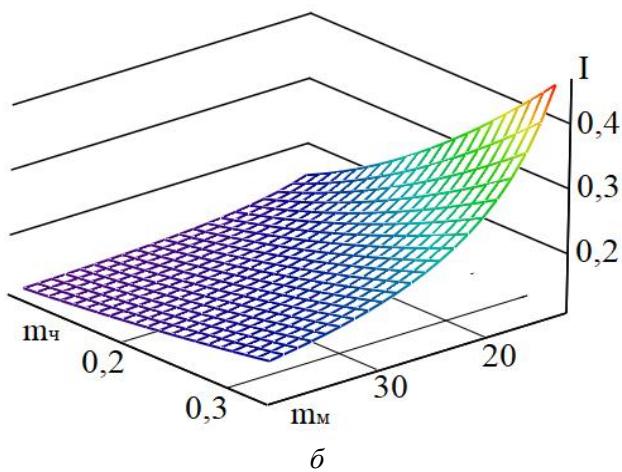


Рис. 6. Графики износа молотка дробилки ДМРиЭ 14,5×13 с использованием:
1 – комбинированного способа крепления; 2 – шарнирного способа крепления

Также увеличилась интенсивность изнашивания отбойной плиты вследствие возрастания скорости движения частиц материала после контактного взаимодействия с билами и выросла степень износа колосников, что обуславливается влиянием массы молотков на увеличение давления частицы материала при взаимодействии с колосниковой решеткой (за счет возрастания центробежных сил тел, взаимодействующих в процессе контакта).

Таким образом, для дальнейших исследований перспективным направлением является изучение метода комбинационного синтеза дробильно-измельчительных машин, направленного на реализацию сочетания достоинств в одном устройстве машин роторного и молоткового типов и определение их основных технико-экономических показателей при дроблении различных шихтовых материалов. В настоящее время работы в этом направлении проводятся в Донбасском государственном техническом университете с привязкой к агломерационному производству Филиала № 12 «Алчевский металлургический комбинат» ЗАО «Внешторгсервис».

Выходы

Полученная математическая модель износа ударных органов при взаимодействии с частицей известняка с учетом угла отклонения молотков, скорости соударения с материалом и эмпирического коэффициента позволяет с достаточной степенью достоверности прогнозировать ресурс молотков в процессе дробления известняка.

Износ ударных рабочих органов с комбинированной заделкой молотков на оси ротора меньше, чем у дробилок с шарнирным креплением.

Перспективным направлением диспергирования флюсов с точки зрения повышения эксплуатационных характеристик молотковых дробилок является синтез их новых конструкций, совмещающих в себе сочетание жесткого крепления молотков в подвесе при возможности их предохранения от разрушения, например, за счет потери жесткости в момент контакта с недробимыми телами.

Результаты исследования могут послужить для развития теории расчета технико-эксплуатационных параметров ударных дробильных машин, а также расширить при соответствующей адаптации методику количественного сопоставительного анализа эффективности различных конструкций молотковых дробилок, применяемых при дроблении различных материалов на других предприятиях черной металлургии и в других отраслях промышленности.

Список литературы

1. Реутова, Я.И. Износ рабочих элементов роторной дробилки / Я.И. Реутова, В.С. Богданов // Молодежь и научно-технический прогресс: материалы IX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых 14 апреля 2016 г., Губкин. – 2016. – С. 47-49.
2. Власенко, Д.А. Влияние крупности сырья на кинематику рабочих органов и материала в молотковой дробилке / Д.А. Власенко, Э.П. Левченко // Вестник ДонНТУ. – 2018. – №3. – С. 9-15.
3. Петров, А.А. Повышение надежности рабочих органов кормодробилок молоткового типа: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / Петров Алексей Анатольевич. – Оренбург: ОГАУ, 2007. – 17 с.
4. Савченко, В.М. Розробка молотків кормодробарок з локальним зносостійким покриттям: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11 / Савченко Василь Миколайович. – Кіровоград, КНГУ, 2008. – 20 с.
5. Гоева, В.В. Определение износа молотков и лопаток вентилятора молотковой дробилки зерна / В.В. Гоева // Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики: материалы X Международной научно-практической конференции «Наука – Технология – Ресурсосбережение» 7 февраля 2017 г., Киров. Сборник научных трудов, посвященный 65-летию со дня образования инженерного факультета Вятской ГСХА. – 2017. – С. 104-109.
6. Колобов, М.Ю. Энергосберегающая технология и технические средства центробежного действия для обработки дисперсных материалов сельскохозяйственного назначения: автореф. дис. ... док. техн. наук: 05.20.01 / Колобов Михаил Юрьевич. – Рязань, ИГСА имени академика Д.К. Беляева, 2010. – 39 с.
7. Preston, E.W. The Theory and Design of Plate Glass Polishing Machines / Journal of the Society Technology. – 1927. – №.11. – Р. 214-256.
8. Пат. 179695 РФ, МПК B02C 13/16. Ротор молотковой дробилки / Д.А. Власенко, А.В. Карпов. – № 2018106733; заявл. 22.02.2018; опубл. 22.05.2018.
9. Колесников, Ю.В. Механика контактного разрушения / Ю.В. Колесников, Е.М. Морозов – М.: Изд-во ЛКИ, 2012. – 224 с.
10. Laursen, T.A. Computational Contact and Impact Mechanics: Fundamentals of Modeling Interfacial Phenomena in Nonlinear Finite Element Analysis. – New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002. – 454 p.

11. Hertz, H. Über die Berührung fester elastischer Körper / H. Hertz // Journal fur die reine und angewandte Mathematik. – Iss.92. – Vol.1882. – 2009. – P. 156-171.
12. Finnie, I. Erosion of Surfaces by Solid Particles / I. Finnie // Wear. – 1960. – Vol.3. – P. 87-103.
13. Власенко, Д.А. Влияние способа крепления молотков на оси ротора на скорость движения известняка к отбойной плите в ударной
- дробилке / Д.А. Власенко, Э.П. Левченко // Сб. науч. тр. Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ДонГТУ, 2017. – Вып.48. – С. 180-184.
14. Белай, Г.Е. Организация металлургического эксперимента: учеб. пособ. для вузов / Г.Е. Белай, В.В. Дембовский, О.В. Соценко / под ред. В.В. Дембовского. – М.: Металлургия, 1993. – 256 с.

D.A. Vlasenko, E.P. Levchenko /Cand. Sci. (Eng.)/, G.A. Bilan
Donbass State Technical University (Alchevsk)

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF HAMMERS WEAR AT FREE IMPACT CRUSHING THE MATERIAL

Background. Crushing processes are very energy-intensive and involve a large loss of metal due to wear of working elements in the operation of crushing machines. This fact determines the importance of studying and improving these processes in order to increase the service life of individual working bodies and units of hammer mills and increase the productivity of crushing machines.

Materials and/or methods. The used mathematical model based on Newton's second law (the differential law of mechanical motion) and Hertz's static shock theory. The aim of this study is to determine the angular position of the hammers relatively to their radial position in the final stage of impact on the particle and the shift values of the material under the displacement relative to the working surface of the hammer at the impact contact in the crusher in the process of preparing fluxes with the combined and hinge mount of a beater on the suspension axis of the rotor.

Results. The results obtained of the mathematical modeling of the process of hammer and particle collision with the combined and hinge attachment of the hammers to the suspension axis of the rotor. Determined the dependence of the values of the deflection angle and the shift of particles on the hammer impact surface on the fractional composition of the crushed material in the process of collision. The values of wear of the working bodies of the hammer crusher in the course of industrial experiment determined.

Conclusion. The deflection angle of a pivotally suspended hammer in the final phase of collision in the hammer mill increases significantly with increasing the fraction of the crushed material, and not significantly changed with the combined attachment. As the angle value increases, the wear of the working surface of the hammer increased by sliding the flux particle along the working surface of the hammer. With the hinge attachment, the trajectory of the material in the working space of the crusher does not provide the entry of the dominant number of material pieces in the area of a bumper plate. Thus, when using a new design of hammer attachment, the wear of individual working bodies of the crusher reduced and the service life increased. The performance of hammer crushers with a combined mount of hammers on the rotor axis is higher compared to crushers having their hinge mount.

Keywords: hammer crusher, hammer, deflection angle, the shift value of the particles at the impact surface.

Сведения об авторах

Д.А. Власенко

СПИН-код: 6296-2040
 Телефон: +380 (72) 112-82-33
 Эл. почта: vlasdmitrij@yandex.ru

Г.А. Билан

Телефон: +380 (95) 340-17-09
 Эл. почта: biga080914@gmail.com

Э.П. Левченко

СПИН-код: 8607-5905
 Телефон: +380 (72) 154-74-30
 Эл. почта: levchenkoeduard@yandex.ua

Статья поступила 11.01.2019 г.
 © Д.А. Власенко, Э.П. Левченко, Г.А. Билан, 2019
 Рецензент д.т.н., доц. Н.А. Ченцов