

О КРИТЕРИЯХ АКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СТРУЙНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

На основе анализа физических закономерностей измельчения и экспериментальных исследований предложены критерии эффективности процесса струйного измельчения, оцениваемые акустическим мониторингом.

На основі аналізу фізичних закономірностей подрібнення та експериментальних досліджень запропоновано критерії ефективності процесу струминного подрібнення, які оцінюються акустичним моніторингом.

Based on the analysis of a physical behavior for grinding and experiments, criteria of the efficiency of jet grinding estimable are proposed using an acoustic monitoring.

Введение. В связи с высокой энергоемкостью процесса струйного измельчения в области получения высокодисперсных порошков (более $0,6 - 1 \text{ м}^2/\text{г}$) весьма актуальна проблема поиска и поддержания оптимального режима измельчения в различных режимах загрузки струй измельчаемым материалом [1, 2]. Обоснованность применения метода акустического мониторинга (АЭ) для исследования процессов измельчения показана в работах [3, 4], где установлена связь количества образованных мелких и тонких фракций (менее $100 - 400 \text{ мкм}$) от удельного (на единицу объема) N_V числа акустических сигналов (АС) при разрушении сжатием модельных образцов горных пород. Прогнозная оценка удельных энергозатрат на измельчение осуществляется на основе следующих параметров АЭ: скорости счета \dot{N} АС на запредельной стадии деформирования, энергетического выхода АЭ N_A ($N_A = N/A$, N , A – число и величина амплитуды АС соответственно) и акустоэмиссионной эффективности разрушения $N\varepsilon$ ($N\varepsilon = N/\varepsilon$, ε – деформация за пределом прочности). Выявлены акустоэмиссионные признаки интенсивного измельчения, в частности увеличение средней \dot{N}_{cp} или максимальной $\dot{N}_{\text{макс}}$ скорости счета акустических сигналов за пределом прочности нагруженного образца. Из анализа закономерностей измельчения горных пород следует высокая информативность акустических параметров, таких как суммарный счет АС, активность АЭ очагов разрушения (диспергирования), амплитудное распределение АС, характеризующее размеры частиц разрушенного продукта.

Целью работы является поиск акустических критериев оценки эффективности струйного измельчения. В процессе исследований акустического мониторинга струйной мельницы решалась задача установления связей производительности с акустическими параметрами при измельчении твердых сыпучих материалов.

Изложение результатов. В процессе струйного измельчения при неизменных параметрах энергоносителя (расход, давление, температура и скорость струй) изменяется количество загружаемой твердой фазы (загрузка мельницы), а также крупность измельчающихся частиц. В зависимости от этих факторов изменяется скорость, частота соударений частиц и соответственно производительность мельницы. В работах [5, 6] рассмотрены особенности наблюдения показателей струйного измельчения при изменении режимных параметров струйной мельницы.

© Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко, И.А. Шуляк, Б.Ф. Бевзенко, 2009

Техн. механика. – 2009. – № 3.

Концентрация твердой фазы в струе при прочих равных условиях определяет эффективность струйного измельчения. Это обусловлено тем, что с увеличением количества частиц в струе выше оптимальной концентрации уменьшается их скорость разгона в инжекторе и в результате меньшей скорости встречных ударов частиц снижается производительность мельницы.

Ранее проведенные исследования [5 – 8] показали целесообразность использования некоторых характеристик акустического излучения при струйном измельчении (число АС в единицу времени, амплитуды сигналов и их распределение по величине) для получения информации о характерных размерах частиц в струе, их гранулометрическом составе, степени загрузки струй материалом. При различных режимах работы струйной мельницы, отличающихся степенью загрузки струй твердой фазой, наблюдаются различия на порядок амплитуд АС, измеряемых в зоне помола.

В данной работе для измельчения использовалась противоточная струйная установка лабораторного типоразмера производительностью 2 – 30 кг/ч, энергоноситель – сжатый воздух среднего давления. Производительность мельницы рассчитывалась на основе взвешивания готового продукта, осажденного в циклоне. Масса порций загружаемого материала составляла $m = 1$ кг, интервал их загрузки – 3 – 8 мин, длительность измельчения – 15 – 30 мин.

Акустическая активность измельчаемых частиц измерялась с применением широкополосного пьезодатчика, соединенного с латунным волноводом, установленным внутри помольной камеры мельницы. Датчик АС, разработанный в МГТУ им. Баумана [5], был соединен с аналогово-цифровым преобразователем и компьютером. Методика обработки опытных данных акустического мониторинга зоны измельчения состояла в следующем. На различных стадиях заполнения помольной камеры материалом измерялось общее число N_{Σ} акустических сигналов различных амплитуд (период измерения АС – $\tau = 1$ с, период регистрации – 0,1 с). Далее определялось число N_x сигналов, характеризующих режим истечения струй без подачи материала в мельницу (фоновый шум, режим «холостого» хода, амплитуда АС менее 0,05 – 0,1 В). Разница ($N_{\Sigma} - N_x$) характеризует искомое число АС для исследуемого режима загрузки и производительности мельницы. Таким образом, полагаем, что величина активности $\dot{N} = (N_{\Sigma} - N_x) / \tau$ (имп/с) акустического излучения характеризует, по сути, реальное число соударений частиц с волноводом, поскольку из общего счета АС исключается фоновый шум струй энергоносителя.

Исследованиями установлена взаимосвязь производительности G (г/с) измельчения и активности \dot{N} (имп/с) АЭ на различных стадиях измельчения: загрузка материала, рабочий процесс, состояние разгрузки струй (см. таблицу 1).

Таблица 1

№	Материал	G , г/с	\dot{N} , имп/с	$\lg \dot{N}$	K_{Σ} , г/имп
1	шамот	1,97	7207	3,86	0,5
2		3,08	9982	4,0	0,77
3		0,54	3660	3,56	0,15
4		5,5	3374	3,5	1,57
5		2,6	22484	4,35	0,6
6		4	3764	3,57	1,12

№	Материал	G, г/с	\dot{N} , имп/с	$\lg \dot{N}$	K_3 , г/имп
7		4,8	6292	3,8	1,26
8		3,6	41943	4,6	0,78
1	известняк	3,5	54759	4,74	0,74
2		3,4	48383	4,7	0,72
3		4,2	63788	4,8	0,87
4		3,8	104590	5,02	0,75
5		3,1	50926	4,7	0,67
6		5,5	7510	3,88	1,4
1	газовый уголь	1,7	114813	5,06	0,34
2		1,4	198239	5,3	0,27
3		3,1	200754	5,3	0,58
1	бурый уголь	1,8	181690	5,26	0,34
2		1,6	303852	5,5	0,29

На рис. 1 иллюстрируется изменение во времени производительности мельницы (по готовому продукту) и акустического излучения зоны помола (в логарифмической шкале). Видно, что на этапе загрузки струй твердой фазой число АС увеличивается, затем в процессе измельчения уменьшается до поступления новой порции в струю.

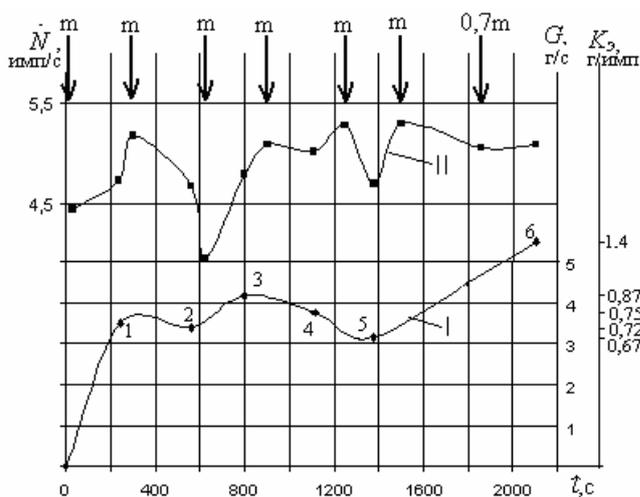


Рис. 1

Эффективность струйного измельчения можно оценивать условным коэффициентом $K_3 = G/\lg \dot{N}$ (г/имп), характеризующим отношение производительности G мельницы к соответствующей активности (в виде логарифма) \dot{N} АЭ в зоне помола. В рабочих режимах струйной мельницы ($G = 1,6 - 5,5$ г/с) величина K_3 изменяется в пределах $0,3 - 1,5$. Изменение G для одного и того же материала обусловлено отклонением насыщенности струй твердой фазой от оптимального уровня. Связь коэффициента K_3 с производительностью мельницы при переработке различных материалов (шамот, известняк, бурый и газовый уголь) показана на рис. 2.

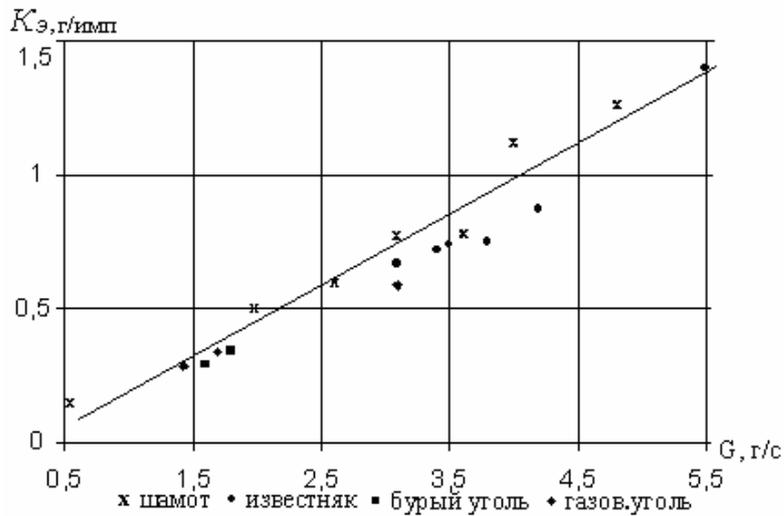


Рис. 2

Поиск оптимального уровня загрузки струй материалом, обеспечивающего максимальную производительность мельницы (т.е. минимальные энергозатраты), проводился по диапазону активности \dot{N} акустического излучения зоны помола, и для материалов с различными свойствами и измельчаемостью оптимальная величина \dot{N}_{opt} изменяется.

На рис. 3 представлено изменение $K_э$ для исследованных материалов в различном диапазоне \dot{N} (имп/с), рассматриваемом в логарифмической шкале.

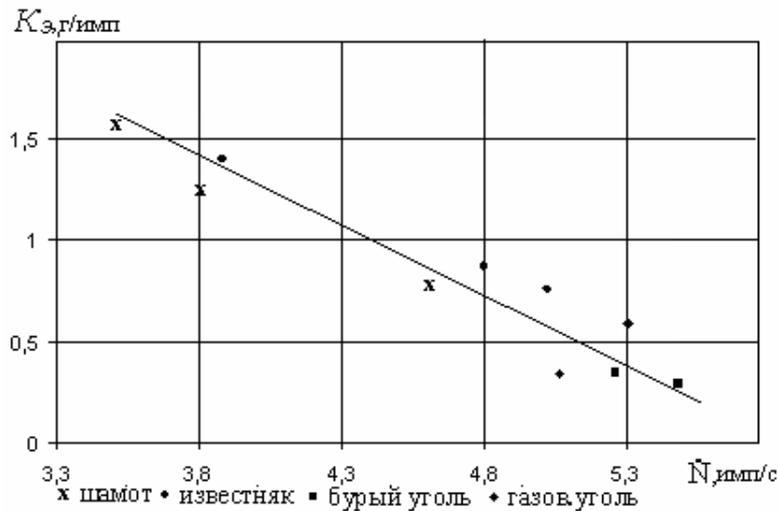


Рис. 3

Установлены следующие оптимальные уровни активности АЭ зоны помола струйной мельницы, при которых достигается эффективность процесса $K_э$ не менее 0,4 г/имп:

шамот: $K_э = 1,6 - 0,7$ (г/имп); $\dot{N} = 10^{3,5-3,8}$ (имп/с);

известняк: $K_3 = 1,4 - 0,8$ (г/имп); $\dot{N} = 10^{3,9-4,8}$ (имп/с);
газовый уголь: $K_3 = 0,4 - 0,6$ (г/имп); $\dot{N} = 10^{5,0-5,3}$ (имп/с);
бурый уголь: $K_3 = 0,4$ (г/имп); $\dot{N} = 10^{5,3}$ (имп/с).

Из рис. 3 видно, что величина K_3 связана обратно пропорциональной зависимостью с показателем $\lg \dot{N}$ степени активности АЭ для процесса измельчения. Полагаем, что повышение частоты регистрации АС на 2 порядка (от 3,5 до 5,3 В) обусловлено ростом дисперсности измельчаемого продукта, сопровождающимся возрастанием долевого участия механизма истирания по сравнению с высокоскоростными ударами частиц.

Оценка дисперсности продуктов струйного измельчения по величине $S_{уд}$ удельной поверхности на приборе Т-3 Товарова В.В. показала следующие результаты:

шамот: $S_{уд} = 0,17 - 0,28$ м²/г; известняк: $S_{уд} = 0,3 - 0,68$ м²/г; газовый уголь: $S_{уд} = 0,97 - 1,88$ м²/г; бурый уголь: $S_{уд} = 1,11 - 1,32$ м²/г.

Сопоставление значений экспериментальных оценок $S_{уд}$, K_3 и \dot{N} позволяет установить закономерность роста уровня активности АЭ при получении более тонкого продукта. Так, процесс измельчения частиц до дисперсности порядка $S_{уд} = 0,2 - 0,3$ м²/г (шамот) сопровождается активностью порядка $\dot{N} = 10^{3,5}$ (имп/с); при $S_{уд} = 0,3-0,6$ м²/г (известняк) $\dot{N} = 10^4$ (имп/с); при $S_{уд} = 1,0 - 1,8$ м²/г (уголь) $\dot{N} = 10^{5,3}$ (имп/с). При этом наблюдается естественная тенденция снижения показателя эффективности струйного измельчения в области более высокой дисперсности получаемого продукта: при $S_{уд} = 0,2 - 0,3$ м²/г $K_{3\max} = 1,6$ (г/имп), тогда как при $S_{уд} = 1,1 - 1,3$ м²/г $K_{3\max} = 0,6$ (г/имп).

Выводы. Критерием оценки соответствия процесса оптимальным условиям измельчения может служить величина отношения K_3 производительности мельницы к акустической активности $\lg \dot{N}$. Проведению акустического мониторинга должен предвдывать экспериментальный выбор других технологических параметров процесса, в частности начального давления и температуры энергоносителя, режима классификации, задающего контрольные размеры частиц готового продукта.

Основу акустического мониторинга струйной мельницы составляет закономерность $\dot{N} = f(G, S_{уд}, K_3)$ изменения акустической активности \dot{N} в зависимости от технологических показателей количества и качества измельченного продукта.

Поддержание оптимальных параметров в процессе работы мельницы следует реализовать путем непрерывного контроля акустической активности зоны помола и управления загрузкой измельчаемого материала на основе поиска оптимальной насыщенности струй твердой фазой.

1. Горобец Л. Ж. Развитие научных основ измельчения твердых полезных ископаемых. Автореф. дис... д-ра техн. наук / НГУ. – Д., 2004. – 35 с.
2. Горобец Л. Ж. Микророшки: технология и оборудование / Л. Ж. Горобец // Збагачення корисних копалин. : Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ, 1999. – № 4 (45). – С.33 – 41.
3. Связь между параметрами акустических сигналов и размерами разрывов сплошности при разрушении гетерогенных материалов / Д. И. Фролов, Р. Ш. Килькеев, В. С. Куженко. С. В. Новиков // Механика композитных материалов. – Рига : Зинатне. – 1980. № 5. – С. 907 – 911.
4. Исследование акустозмиссионных свойств природных материалов в режиме высоких давлений/ Л. Ж. Горобец, В. Н. Бовенко, С. Б. Дуброва, О. Ф. Панченко // Физика и техника высоких давлений. – 1995. – №3. – С. 65 – 73.

5. Параметри акустического излучения промышленной газоструйной установки / П. И. Пилов, Л. Ж. Горобец, В. Н. Бовенко, Н. С. Прядко, А.Е.Щербаков, И. В. Верхоробина // Вестник нац. техн. ун-та «ХПИ». – Харьков, 2007. – Вип. № 27. – С. 33 – 41.
6. An acoustic monitoring of the sizes changes of grinded particles / P. I. Pilov, L. J. Gorobets, V. N. Bovenko, N.S. Pryadko // Науковий вісник НГУ. – 2008. – №6. – С. 23 – 26.
7. Технологические возможности струйных измельчителей / Пилов П. И., Горобец Л. Ж., Верхоробина И. В. // ГИАБ. – 2007. – №3. – С. 359 – 367.
8. Акустическое исследование измельчаемости гетерогенных материалов струйным способом / П. И. Пилов, Л. Ж. Горобец, В. Н. Бовенко, Н. С. Прядко // ЗКК. – №34 (75). – 2008. – С. 67–74.

Институт технической механики
НАН Украины и НКА Украины,
Днепропетровск

Получено 12.03.09,
в окончательном варианте 25.05.09