

Инженерно-технические науки

Engineering and technical sciences

УДК 66-931.2

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕЛЬНИЦЫ УДАРНО-ОТРАЖАТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ

Т.В. Гущина, Е.А. Гущина, М.Ю. Колобов, В.Н. Блиничев
Ивановский государственный химико-технологический университет

В статье проведены исследования по измельчению кварцевого песка в многоступенчатой мельнице ударно-отражательного действия. Доказано, что вследствие волнового характера деформаций в частицах динамические напряжения, возникающие в частице после первого удара, суммируются с напряжениями последующих ударов. Используя предложенные уравнения и зависимость критической скорости удара от размеров и прочности частиц, возможно предсказать степень измельчения и гранулометрический состав продуктов измельчения, получаемых в мельницах ударно-отражательного действия.

Ключевые слова: измельчение, многоступенчатая мельница, прочность, скорость нагружения, число ударов.

Получение высокодисперсных порошков требует больших затрат энергии вследствие существенного повышения скорости нагружения измельчаемых материалов при уменьшении их линейных

размеров, достаточной для создания внутренних напряжений, превышающих их предел прочности [1].

Была изготовлена лабораторная многоступенчатая мельница (рис. 1).

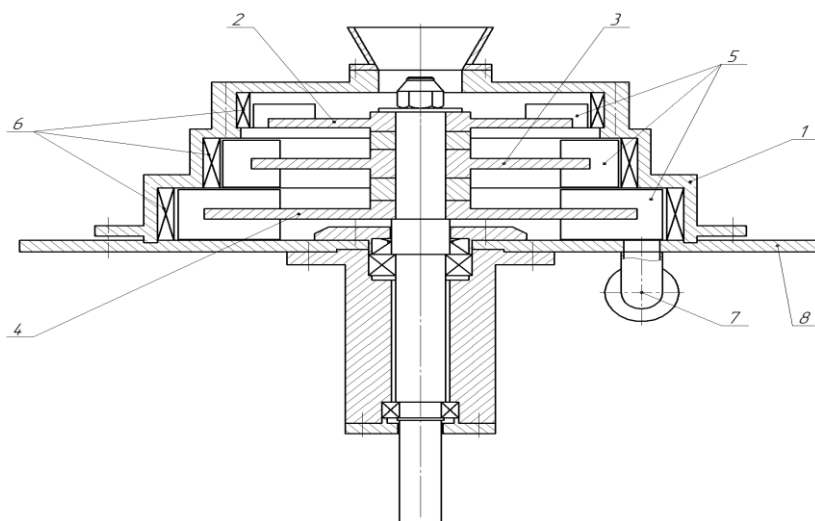


Рис. 1. Схема лабораторной мельницы

Мельница содержит корпус 1, внутри которого установлен ротор, включающий 3 диска 2, 3, 4 диаметрами: 200, 237, 290 мм. На дисках приварены била 5. Внутри корпуса установлены отбойники 6. Выгрузочный патрубок 7 расположен на нижней крышке 8 корпуса. Материал, подлежащий измельчению, подается в центр мельницы и, пройдя три ступени нагружения, выводится через выгрузочный патрубок.

В качестве объекта измельчения был выбран кварцевый песок нескольких фракций с твердостью по шкале Мооса – 7.

Предел прочности кварцевого песка $\sigma_B = 160-180$ МПа.

Экспериментально были найдены критические скорости ударного нагружения для исследуемых фракций кварцевого песка (табл. 1).

Таблица 1

Зависимость критической скорости ударного разрушения частиц кварцевого песка от их размеров

d, мм	$V_{кр(50\%)}$, м/с
1 – 1,6	61,5
0,63 – 1	81
0,4 – 0,63	95

Под критической скоростью понимается такая скорость, при которой при однократном ударе разрушается 50% частиц данного размера. Как видно из таблицы 1, даже при небольшом уменьшении размеров частиц критическая скорость ударного разрушения частиц кварцевого песка существенно возрастает.

В мельницах сложно создать в частицах при одном ударе внутренние

напряжения больше предела прочности. В исследуемой трехступенчатой мельнице ударно-отражательного типа измельчаемые частицы получают удары билами трех ступеней ротора, удары об отбойники, а также соударения частиц друг с другом.

В таблице 2 представлены линейные скорости бил на трех ступенях ротора.

Таблица 2

Зависимость линейной скорости бил на трех ступенях от числа оборотов ротора

n об/мин	Скорость бил ротора		
	1 ступень v_1 , м/с	2 ступень v_2 , м/с	3 ступень v_3 , м/с
3000	30,3	36	43,6
3500	35,3	42	50,8
4000	40,3	48	58,1
4365	44	52,4	63,4

Сравнение критических скоростей и линейных скоростей бил показывает, что ни при одном режиме работы мельницы, ни на одном диске критические скорости разрушения частиц кварцевого песка фракции 0,63-1 мм не достигаются. В то же время проведенные нами исследования вероятности разрушения трех вышеуказанных фракций песка как на

отдельных дисках ротора, так и в сборе ротора со всеми тремя дисками показывают, что во всех случаях вероятность разрушения была выше критической (более 50%) [2].

Результаты исследования вероятности разрушения частиц песка фракции 0,63-1 мм представлены в таблице 3.

Таблица 3

Зависимость вероятности разрушения частиц песка от числа оборотов ротора

Число оборотов ротора, об/мин	Вероятность разрушения, %			
	Верхний диск	Средний диск	Нижний диск	Ротор в сборе
3000	65,44	71,5	94	98,68
3500	66,14	75,3	96	99,45
4000	73,2	89,5	98,2	100
4365	85,04	89,9	98,8	100

При работе одного малого (верхнего) диска ротора и линейной скорости его бил, равной 30,3 м/с вероятность разрушения составила 65,4%, т.е. существенно больше, чем при критической скорости.

Все это свидетельствует о том, что, во-первых, частицы даже при работе на одном вращающемся диске успевают получить несколько ударов, во-вторых, внутренние напряжения, полученные частицей при одном ударе не успевают релаксировать, накапливаются в ней, а при следующих ударах суммируются с первичными напряжениями.

Даже при одном ударе в частице возникает сложное напряженное состояние и определенное время по ней проходят прямые и обратные волны деформаций [3, 4].

Исследования, проведенные Ладаевым Н.М. [5] по определению вероятности разрушения частиц кварцевого песка размером 0,63-1 мм от скорости единичного удара показывают, что при скорости 33,4 м/с вероятность разрушения частиц песка должна быть порядка 8%.

В действительности при наличии в машине только одного верхнего диска с билами вероятность разрушения потока частиц кварцевого песка со средним размером 0,815 мм при производительности 100 кг/ч составляет 65,4%. Следовательно, у 65,4% потока частиц создались напряжения более предела прочности,

$$\sigma_{max} > \sigma_v.$$

Аэродинамические силы потока воздуха способствовали достаточно быстрому прохождению частиц через первую, вторую и третью ступени нагружения. Следовательно, чередующиеся друг за другом удары билами, отбойниками, а также соударения частиц друг с другом в турбулентных потоках воздуха в зонах между дисками, отбойниками и корпусом вызывают мощную концентрацию внутренних напряжений около дефектов, имеющихся в частице.

Определим силы, действующие на частицы при ударах. Механизм возникновения динамических сил, возникающих при ударном нагружении частиц, можно объяснить, используя уравнение количества движения [6]:

$$m_{\text{ч}} \cdot V_{\text{уд}} = P_{\text{дин}} \cdot \Delta\tau, \quad (1)$$

где $m_{\text{ч}}$ – масса частицы; $V_{\text{уд}}$ – скорость удара; $P_{\text{дин}}$ – динамическая сила, вызывающая при ударе волновой характер деформаций и, соответственно, напряжений; $\Delta\tau$ – время контакта частицы с поверхностью удара, колеблется в зависимости от упругих свойств сталкивающихся тел от $\Delta\tau = 1 \cdot 10^{-3}$ с до $\Delta\tau = 1 \cdot 10^{-4}$ с.

В уравнении (1) нам известны: масса частицы ($m_{\text{ч}}$), скорость ударного нагружения билами ($V_{\text{уд}}$) и время контакта ($\Delta\tau$), принятого нами равным $\Delta\tau = 1 \cdot 10^{-4}$ с для частиц, обладающих упругими

деформациями (частиц кварцевого песка). Поэтому, используя уравнение (1), мы в каждом опыте рассчитывали значения динамических сил, которые создают в нагруженных частицах волны упругих деформаций.

Расчеты напряжений в частице по найденному значению динамических сил при всех скоростях ударного нагружения по методике определения прочности частиц при статическом нагружении по уравнению (2) показали, что значения напряжений в частицах чрезвычайно малы, в сотни раз меньше $\sigma_{\text{в}}$:

$$\sigma = \frac{P_{\text{дин}}}{F_{\text{ч}}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{дин}}$ – динамическая сила, рассчитанная по уравнению (1); $F_{\text{ч}}$ – площадь поперечного сечения частицы, $F_{\text{ч}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{ч}}^2}{4}$.

$$\sigma_{\text{дин}} = K_{\text{конц}} \frac{P_{\text{дин}}}{0,1 \cdot F_{\text{ч}}}. \quad (3)$$

Решая обратную задачу, зная, что, например, при измельчении кварцевого песка с одним верхним диском у 65,4% частиц создались динамические напряжения большие или равные пределу их

прочности, разработали методику расчета приведенного числа ударных нагружений, получаемых частицей на каждой ступени ротора:

$$\sum_{i=1}^{i=n} \sigma_{\text{дин } i} = \sigma_{\text{в}}, \quad (4)$$

где n – приведенное (к известной линейной скорости бил ступеней) число ударных нагружений.

Расчеты приведенного числа ударных нагружений для трех ступеней ротора лабораторной мельницы представлены в таблице 4.

Учитывая, что доля напряжений, создаваемых в частицах ударными нагружениями непосредственно билами составляет порядка 60% от всех ударов, мы получаем значения величин числа ударов билами (с известной, заранее задаваемой нами скоростью).

Данные исследования подтвердили возможность использования уравне-

ния (3) для расчета реальных динамических напряжений при проектировании многоступенчатых мельниц ударно-отражательного принципа действия.

Анализ гранулометрического состава продуктов измельчения кварцевого песка возможно получение высокой степени измельчения при малых удельных затратах энергии. Для песка при изменении чисел оборотов от 3000 об/мин до 4365 об/мин степень измельчения повышалась от 12 до 18. Удельные затраты энергии изменялись при этом от 15 до 30 кВт·ч/тонну. В шаровой мельнице такой продукт можно получить при 150-200 кВт·ч/тонну продукта.

Таблица 4

Число ударов частицы, совершаемое до полного разрушения

n, об/мин	n (число ударов)		
	Верхний диск	Средний диск	Нижний диск
3000	9	7	6
3500	8	6	5
4000	7	6	5
4365	6	5	4

Выводы

1. Волновой характер напряженно-го состояния частиц при быстро повторяющихся ударах, получаемых частицами в разных точках ударного нагружения, приводит к мощной концентрации напряжений около дефектов структуры частиц, которая должна учитываться при расчете максимальных динамических напряжений коэффициентом концентрации напряжений.

2. Доказано, что вследствие волнового характера деформаций в частицах динамические напряжения, возникающие в частице после первого удара, суммируются с напряжениями последующих ударов.

3. Используя уравнение (3) и зависимость критической скорости удара от размеров и прочности частиц, возможно предсказать степень измельчения и гранулометрический состав продуктов измельчения, получаемых в мельницах

ударно-отражательного принципа действия.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-03-00787.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черепанов Г.П., Ершов Л.В. Механика разрушения. – М.: Машиностроение, 1977. – 225 с.
2. Гущина Е.А., Гущина Т.В., Блиничев В.Н. Разработка и исследование энерго- и ресурсоберегающих машин для тонкого измельчения материалов // Надежность и долговечность машин и механизмов: сборник XI Всероссийской научно-практической конференции. Иваново. 2020. – с. 33-37.
3. Бидерман О.Э. Теория удара. – М.: Машиностроение, 1960.
4. Динамика удара. Пер. с англ. Под ред. С.С. Григоряна. – М.: «Мир», 1985. – 296 с.
5. Ладаев Н.М., Жбанов Н.С. Влияние вероятности разрушения на степень измельчения материалов // Vestnik MISU, №5, 2012. – с. 103-106.
6. Разрушение. Т. 2. Математические основы теории разрушения. Пер. с англ. Под ред. Г. Либовиц. – М.: «Мир», 1975. – 763 с.

RESEARCH OF THE MILL SHOCK-REFLECTIVE ACTION

T.V. Gushchina, E.A. Gushchina, M.Yu. Kolobov, V.N. Blinichev
Ivanovo State University of Chemical Technology

The article studies the grinding of quartz sand in a multi-stage mill of shock-reflective action. It is proved that due to the wave nature of deformations in particles, the dynamic stresses arising in the particle after the first impact are summed up with the stresses of subsequent impacts. Using the proposed equations and the dependence of the critical impact velocity on the size and strength of the particles, it is possible to predict the degree of grinding and particle size distribution of grinding products obtained in mills of the shock-reflective principle of action.

Keywords: grinding, multistage mill, strength, loading speed, number of impacts.

References

1. Cherepanov G.P., Ershov L.V. Mekhanika razrusheniya. – M.: Mashinostroenie, 1977. – 225 s.
2. Gushchina E.A., Gushchina T.V., Blinichev V.N. Razrabotka i issledovanie energo- i resursosberegayushchih mashin dlya tonkogo izmel'cheniya materialov // Nadezhnost' i dolgovechnost' mashin i mekhanizmov: sbornik XI Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Ivanovo. 2020. – s. 33-37.
3. Biderman O.E. Teoriya udara. – M.: Mashinostroenie, 1960.
4. Dinamika udara. Per. s angl. Pod red. S.S. Grigoryana. – M.: «Mir», 1985. – 296 s.
5. Ladaev N.M., ZHbanov N.S. Vliyanie veroyatnosti razrusheniya na stepen' izmel'cheniya materialov // Vestnik MISU, №5, 2012. – s. 103-106.
6. Razrushenie. T. 2. Matematicheskie osnovy teorii razrusheniya. Per. s angl. Pod red. G. Libovic. – M.: «Mir», 1975. – 763 s.