

УДК 621.926

**Гурьянов Георгий Александрович**, канд. техн. наук, проф.,  
ВКГТУ им. Д. Серикбаева, Республика Казахстан, 070003, г. Усть-Каменогорск,  
ул. Серикбаева 19, GGuryanov@ektu.kz,

**Байгереев Самат Рахимгалиевич**, магистр, старший преподаватель,  
ВКГТУ им. Д. Серикбаева, Республика Казахстан, 070003, г. Усть-Каменогорск,  
ул. Серикбаева 19, samat.baigereyev@mail.ru,

**Сулейменов Ансаган Дюсембаевич**, магистр,  
ВКГТУ им. Д. Серикбаева, Республика Казахстан, 070003, г. Усть-Каменогорск,  
ул. Серикбаева 19, ansar\_muslim\_91@mail.ru

## **АНАЛИЗ И ВЫБОР РАЗРУШАЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕЙ ТОНКОГО ПОМОЛА**

**Аннотация.** Данная статья посвящена теоретическим исследованиям физико-механических процессов применяемых способов тонкого измельчения материалов. В ходе проведенных исследований выбран и теоретически обоснован наиболее эффективный способ разрушающего воздействия.

**Ключевые слова:** измельчение, помол, мельница, измельчительная машина, способ разрушения, энергоэффективность.

**Guryanov Georgy A.**, Candidate of Technical Sciences, professor,  
D. Serikbayev EKSTU, 19, Serikbayev str., Ust-Kamenogorsk, 070003,  
The Republic of Kazakhstan, GGuryanov@ektu.kz,

**Baigereyev Samat R.**, Master of Engineering, senior lecturer,  
D. Serikbayev EKSTU, 19, Serikbayev str., Ust-Kamenogorsk, 070003,  
The Republic of Kazakhstan, samat.baigereyev@mail.ru,

**Suleimenov Ansagan D.**, Master of Engineering,  
D. Serikbayev EKSTU, 19, Serikbayev str., Ust-Kamenogorsk, 070003,  
The Republic of Kazakhstan, ansar\_muslim\_91@mail.ru

## **ANALYSIS AND SELECTION OF THE DESTRUCTION WAYS TO CREATE EFFECTIVE GRINDING MACHINERY**

**Abstract.** This article is dedicated to theoretical studies of the physical and mechanical processes used methods of fine grinding materials. As a result, it has been chosen and theoretically proved the most effective way to destruct materials.

**Key words:** grinding, milling, mill, grinding puck machine, the method of destruction, energy efficiency.

### Введение

Процесс измельчения является важной составляющей производственного процесса в горно-обогатительной и строительной отраслях. Это связано с необходимостью разрушения материала до определенной крупности (как правило, от 1 мм до десятков микрон) или определенного гранулометрического состава. Следует отметить, что процесс измельчения на сегодняшний день является чрезвычайно энергоемким и дорогостоящим.

В настоящее время наиболее важными являются вопросы оптимизации по критериям энерго- и ресурсосбережения, следовательно, повышение эффективности процессов измельчения является чрезвычайно актуальным. Это достигается разработкой и внедрением измельчительных машин с улучшенными показателями функционирования.

В процессе измельчения горных пород частицы разрушаются в результате невыполнения условий прочности нормальных  $\sigma$  и касательных  $\tau$  напряжений, возникающих в материале при образовании следующих видов деформаций: сжатия, растяжения, изгиба и сдвига, т.е.:

$$\sigma = \frac{F}{S} > \sigma_{\text{lim}}, \quad (1)$$

$$\tau = \frac{F_{\tau}}{S} > \tau_{\text{lim}}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{\text{lim}}$ ,  $\tau_{\text{lim}}$  – предельные значения соответственно нормальных и касательных напряжений измельчаемого материала [1].

Для обеспечения соответствующего вида деформации применяются истирание, раздавливание, раскалывание, излом, срез, а также ударное действие, как наиболее распространенные методы измельчения различных видов материалов (рис. 1) [2].

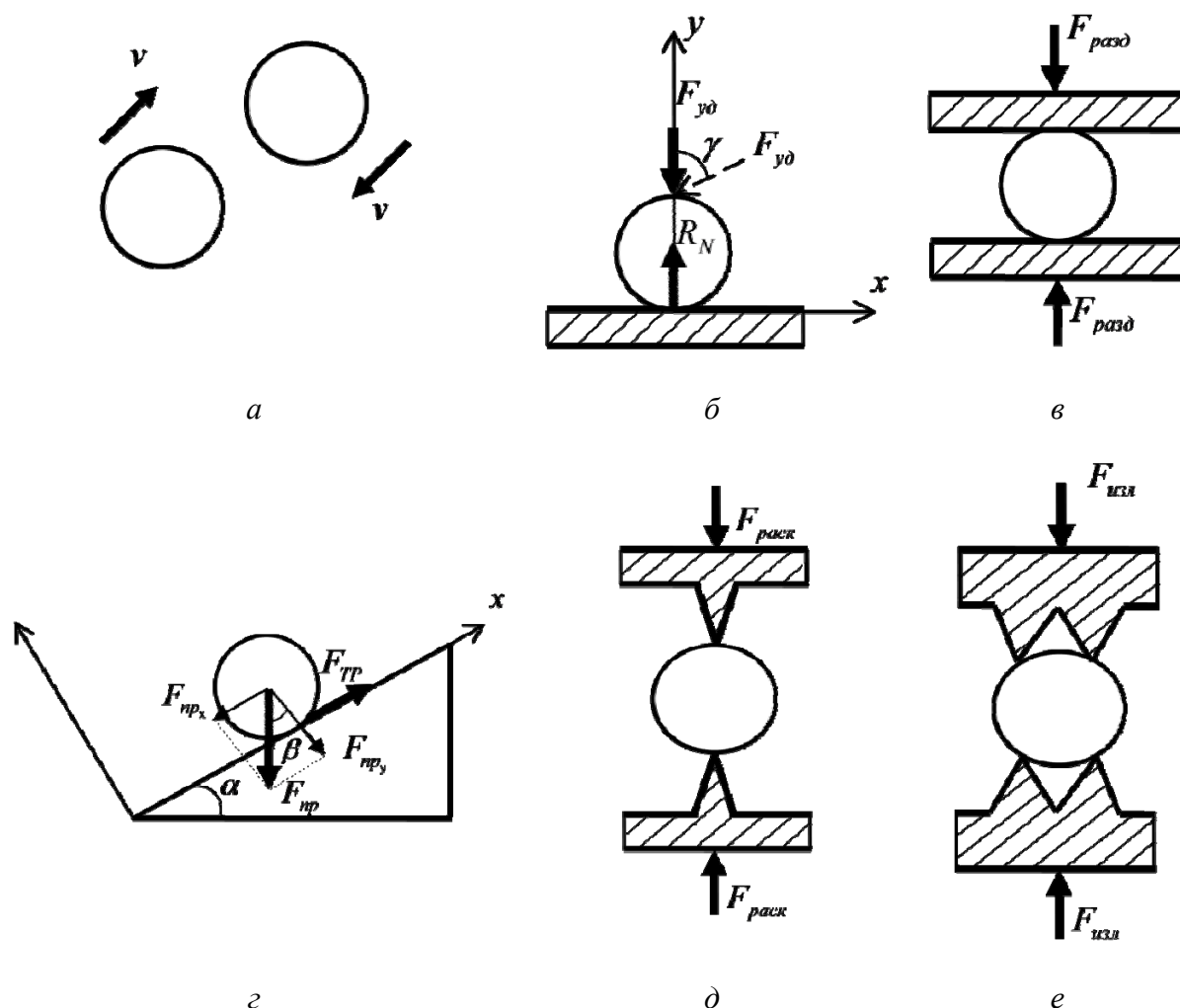


Рис. 1. Распространенные виды разрушающего воздействия при тонком измельчении

Новизна исследования заключается в том, что авторами данной статьи проведен детальный анализ существующих измельчительных машин тонкого помола с целью определения эффективного разрушающего воздействия по критериям максимальных удельной поверхности  $S$  и производительности  $W$ , а также минимальной потребляемой мощности  $P$ .

### Анализ способов разрушения материалов

Как правило, при механическом диспергировании обрабатываемого материала посредством деформации сжатия, последний подвергается одиночному или комплексному действию сил статического раздавливания, истирания и удара. В результате сжатия происходит постепенное

повышение внутреннего напряжения, при котором при достижении значения выше предела прочности сжатия материал разрушается. Это сопровождается появлением трещин, распространяющихся в направлении сжатия, и не приводящих, как правило, к полному разрушению материала. Данное явление объясняется тем, что частицы будут удерживаться вместе еще сохранившимися внутренними связями, а также силами трения, возникающими между частицами и сжимающими поверхностями. При продолжении сжатия трещины увеличиваются, от тела отделяются мелкие частицы, но его основная масса останется в компактном состоянии даже и тогда, когда сжимающая нагрузка будет снята.

Процесс разрушения частиц посредством ударного воздействия может быть осуществлен в двух вариантах:

1) *свободный удар* (рис. 1, а), при котором на частицу с массой  $m$  действует сила  $F_{уд}$ , численное значение которой определяется из условия возникновения равнозамедленного ускорения в момент удара (второй закон Ньютона):

$$F = m \cdot \frac{dv}{dt} \quad (3)$$

при отсутствии опорной реакции  $R_N$  ( $R_N = 0$ ).

2) *стесненный удар* (рис. 1, б), характеризующийся ударным воздействием  $F_{уд}$  на частицу, находящуюся на опоре. При этом следует констатировать, что при организации данного вида удара эффект измельчения возрастает в 2 раза в связи с влиянием на частицу дополнительного воздействия опорной реакции

$$R_N = F_{уд} \cdot \cos \gamma, \quad (4)$$

где угловой параметр  $\gamma$  учитывает эффективность удара в зависимости от отклонения вектора силы  $\bar{F}_{уд}$  на угол  $\gamma$  от горизонтальной или вертикальной осей, перпендикулярных опорной плоскости. Следовательно,

при разработке и обосновании параметров измельчительных машин тонкого помола необходимо при стесненном ударе конструктивно обеспечить выполнение условия:  $\gamma = 0$ .

При *раздавливании* под действием нагрузки, создаваемой силой  $F_{\text{разд}}$ , материал деформируется по всему объему (рис. 1, в). Дальнейшее сжатие тела может привести к спрессовыванию частиц, т.е. процессу, обратному измельчению [3].

Процесс *истирания* применяется при тонком и коллоидном помолах. Этот процесс осуществляется под воздействием на материал сил сжатия, растяжения и среза, возникающих за счет прижатия частицы рабочим органом к опоре и его перемещением в противоположные стороны. Для установления факторов, влияющих на эффективность истирания, следует рассмотреть классическую схему сил, действующих на частицу, находящуюся на наклонной плоскости в момент соприкосновения рабочего органа с частицей (рис. 1, г).

Спроецировав все силы на ось абсцисс, можно получить аналитическое выражение силы истирания:

$$F_{\text{ТР}} = F_{\text{пр}} \cdot \sin\beta. \quad (5)$$

Из формулы (5) следует, что для повышения эффективности разрушения материала истиранием необходимо обеспечить необходимую силу прижатия  $F_{\text{пр}}$  с направлением вектора этой силы, перпендикулярной оси  $X$ , т.е.  $\beta = 90^\circ$ .

Процесс *раскалывания* осуществляется за счет создания больших концентраций нагрузок в местах контакта материала с клинообразным рабочим элементом, на который воздействует сила  $F_{\text{раск}}$  (рис. 1, д).

Процесс *излома* осуществляется за счет воздействия на материал изгибающих сил  $F_{\text{изл}}$  (рис. 1, е). Размеры и форма получаемых частиц примерно такие же, как и при раскалывании.

Учитывая постановку задачи, связанной с созданием измельчителей тонкого помола, физические особенности процессов раскалывания и излома, а также несоразмерное соотношение размеров рабочего органа машины и частицы, необходимо отметить, что указанные способы разрушения следует исключить из исследуемой выборки.

На основании проведенного обширного анализа авторы статьи пришли к выводу, что для повышения эффективности измельчения необходимо применить комбинированный подход к выбору вида разрушающего воздействия. В этой связи, в условиях повышенной потребности разработки измельчительного оборудования с рациональными критериями функционирования, задача выбора наилучшей комбинации способа разрушения является актуальной.

Руководствуясь математической формулой комбинаторики

$$C_m^n = \frac{m!}{n! \cdot (m-n)!}, \quad (6)$$

теоретическое количество сочетаний из  $m = 4$  применяемых методов разрушения по  $n = 2$  в группах составляет  $C_4^2 = 6$ , а при  $n = 3$  –  $C_4^3 = 4$  уникальных сочетаний.

Однако, принимая во внимание особенности физического процесса некоторых способов разрушений, применение всех возможных сочетаний методов диспергирования частиц при создании машин тонкого помола является нецелесообразным. В этой связи принцип работы большинства машин для тонкого измельчения материалов основан на применении следующего основного комплекса видов разрушения: раздавливание и истирание, удар с раздавливанием и истиранием, а также в определенных случаях к главным усилиям присоединяются побочные – изгибающие, разрезающие и свободный удар [4].

Применение комплексного способа разрушения при измельчении требует учета дополнительных факторов, влияющих на эффективность процесса дезинтеграции частиц материала:

1) одновременность действий видов разрушающего воздействия, что в свою очередь минимизирует затраты времени на измельчение  $t$  и характеризуется функциональной зависимостью энергии  $E$  от времени  $t$ :

$$E(t) = \min; \quad (7)$$

2) степень проявления способов разрушающего воздействия  $\Omega$  при комбинированном виде разрушения, что определяет максимальную производительность измельчения:

$$W(\Omega) = \max; \quad (8)$$

3) степень проявления способов разрушающего воздействия  $\Omega$  в зависимости от удельной поверхности материала  $S$  с учетом основных законов механики разрушения материалов, что устанавливает ограничение на зависимость (8) в связи с повышением прочности материалов при увеличении их удельной поверхности вследствие уменьшения количества их внутренних дефектов. Отсюда следует, что при проектировании измельчительной машины тонкого помола существует вероятность полной потери влияния («отключения») некоторых видов воздействия на процесс измельчения с уменьшением диаметра частицы материала. Данный факт подтверждается исследованиями процесса измельчения материала в центробежной мельнице, в которой удар как способ разрушения уступил свое ведущее значение истиранию, возникающему вдоль стенок измельчительной камеры при условиях максимальной величины структурной прочности  $\sigma = \sigma_{\max}$  материала и минимального значения диаметра  $d$  и массы  $m$  частицы [5].

Теория и практика измельчения показывает, что при комбинированной организации разрушающего воздействия присутствует преобладание определенных способов дезинтеграции частиц в зависимости от конструктивных особенностей измельчительных машин (табл. 1).

Таблица 1

Способы разрушающего воздействия  
в некоторых существующих измельчителях тонкого помола

| №, п/п | Вид измельчительной машины  | Способы разрушения |                                             | Преобладающий способ  |
|--------|-----------------------------|--------------------|---------------------------------------------|-----------------------|
|        |                             | №1                 | №2                                          |                       |
| 1      | Шаровая мельница            | истирание          | стесненный удар                             | <b>истирание</b>      |
| 2      | Центробежная мельница       | истирание          | свободный удар                              | <b>свободный удар</b> |
| 3      | Вибрационная мельница       | истирание          | стесненный удар (при определенных условиях) | <b>истирание</b>      |
| 4      | Ролико-кольцевая мельница   | раздавливание      | истирание                                   | <b>истирание</b>      |
| 5      | Коллоидная мельница         | разрыв             | истирание                                   | <b>истирание</b>      |
| 6      | Струйная мельница           | истирание          | свободный удар                              | <b>свободный удар</b> |
| 7      | Стригально-режущая мельница | истирание          | —                                           | <b>истирание</b>      |

Из проведенного анализа (табл. 1) видно, что принцип работы каждой мельницы базируется на комбинированном подходе к разрушению с явным преобладанием одного из способов разрушения, что, по мнению авторов статьи, оказывает негативное влияние на показатель тонкости измельчения. Как следствие, следует отметить, что при создании измельчительной машины высокой эффективности необходимо обеспечить равенство степеней влияния каждого вида разрушения:

$$\Omega_1 = \Omega_2 = \dots \Omega_n. \quad (9)$$

От преобладания соответствующего способа разрушения в определенной комбинации зависит количество энергии  $W$ , расходуемой на образование единицы новой поверхности. Энергия процесса измельчения должна быть достаточной для создания таких напряжений, которые при достижении предельных значений приведут к разрушению материала с образованием мелких фракций. При этом расход энергии, необходимой для создания предельных напряжений, может существенно различаться в

зависимости от физико-механических свойств измельчаемого материала и способа приложения разрушающих сил.

### **Выводы**

Исходя из проведенных обзорно-теоретических исследований следует, что выполнение условия (9) вероятно приведет к повышению мощности, что в свою очередь при соответствующей организации процесса измельчения должно компенсироваться за счет усиления каждого вида воздействия. Тогда выражение (9) можно записать так:

$$\sum \Omega_2 = (1 + x) \cdot (\Omega_2 + \Omega_1 + \dots \Omega_n). \quad (10)$$

Таким образом, должен возникнуть так называемый синергетический эффект, выраженный в возрастании эффективности измельчения в результате интеграции отдельных компонентов в единую систему и взаимном усилении действия каждого из них.

Полученные выводы положены в основу разработки инновационной измельчительной машины с улучшенными показателями функционирования.

### **Список литературы**

1. Дарков, А.В. Сопротивление материалов / А.В. Дарков, Г.С. Шпиро. – М.: Высшая школа, 1975. – 657 с.
2. Олевский, В.А. Размольное оборудование обогатительных фабрик: справ. пособие по конструкциям, расчету и эксплуатации шаровых и стержневых мельниц / В.А. Олевский. – М.: Госгортехиздат, 1963. – 448 с.
3. Чаблин, Б.В. Оборудование предприятий общественного питания. Ч. 1. Механическое оборудование: учеб. пособие / Б.В. Чаблин, И.А. Евдокимов. – 2-е изд. – М.: Direct Media, 2015. – 708 с.
4. Костылев, А.А. Исследование процесса измельчения в роторно-вихревой мельнице тонкого помола / А.А. Костылев // Вестник КрасГАУ. – 2014. – Вып. 8. – С. 245–250.

5. Акунов, В.И. О выборе оптимальных типов измельчителей / В.И. Акунов // Строительные материалы. – 1962. – № 11. – С. 21–22.

### References

1. Darkov A.V., Shpiro G.S. *Soprotivlenie materialov* (Strength of materials), Moscow, Vysshaya shkola, 1975, 657 p.
2. Olevskiy V.A. *Razmol'noe oborudovanie obogatitel'nykh fabrik* (Grinding Equipment concentrators), Moscow, Gosudarstvennoe nauchno-technicheskoe izdatel'stvo literatury po gornomu delu, 1963, pp. 9–10.
3. Chablin B.V., Evdokimov I.A. *Oborudovanie predpriyatiy obshestvennogo pitaniya. Chast' 1. Mechanicheskoe oborudovanie* (Catering equipment), Moscow, Direct Media, 2015, 708 p.
4. Kostylev A.A. *Vestnik KrasGAU*, 2014, no 8, pp. 245–250.
5. Akunov V.I. *Strtoitel'nye materialy*, 1962, no. 11, pp. 21–22.