

УДК 621.926

DOI: 10.31799/978-5-8088-1446-2-2020-15-163-167

**Л. Л. Сотник\***

старший преподаватель, руководитель секции

**Л. А. Сиваченко\*\***

доктор технических наук, профессор

\*Барановичский государственный университет

\*\*Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования Белорусско-Российский университет

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛА В ВИБРОВАЛКОВОМ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕ

Приведено моделирование процесса деформирования материала в вибровалковом измельчителе. Проведен анализ воздействия усилий от раздавливающе-сдвигового и от вибрационного (ударного) деформирования. Представлена модель колебательного движения вала.

**Ключевые слова:** деформации, усилие, сопротивление, вибровалковый измельчитель, эксцентриковый валок, вибрации.

**L. L. Sotnik\***

Senior Lecturer, Section Leader

**L. A. Sivachenko\*\***

Dr. Sc. Tech., Professor

\*Educational Institution Baranavichy State University

\*\*Interstate Higher Education Institution Belarusian-Russian University

## MODELING OF THE MATERIAL DEFORMATION PROCESS IN A VIBRAROLL GRINDER

The article presents a simulation of the process of deformation of a material in a vibraroll grinder. The analysis of the impact of forces from crushing-shear and from vibration (shock) deformation is carried out. A model of the oscillatory motion of the roll is presented.

**Keywords:** deformations, force, resistance, vibraroll grinder, eccentric roll, vibration.

Измельчению подвергаются материалы, имеющие различную прочность, твердость и абразивность. Процесс разделения исходного куска материала на отдельные части происходит, когда внешние механические силы превышают внутренние силы молекулярного взаимодействия. При этом процесс измельчения происходит с образованием новых поверхностей [1].

Согласно имеющимся в литературе данным [2–8] реальная прочность измельчаемых материалов на несколько порядков ниже теоретической прочности. Поверхностные слои материала являются потенциально возможными местами зарождения трещин.

Одной из важнейших характеристик, определяющих эффективность работы вибровалкового измельчителя является усилие воздействия валков на измельчаемый материал, которое напрямую влияет на энергозатраты процесса измельчения и зависит от многих параметров.

Для того чтобы разрушить тело, его необходимо деформировать на такую величину, при которой в материале возникнет разрушающее напряжение.

В вибровалковом измельчителе на материал действуют раздавливающе-сдвиговые и вибрационные (ударные) деформации [9–11]. Суммарное усилие, приходящееся на материал:

$$P_{\Sigma} = \bar{P}_p + \bar{P}_{\text{виб}}, \quad (1)$$

где  $P_p$  – усилие от раздавливающе-сдвигового воздействия;  $P_{\text{виб}}$  – усилие от вибрационного воздействия.

Рассмотрим процесс разрушения материала раздавливающе-сдвиговым усилием в вибровалковой измельчителе при условии, что:

– нормальные напряжения действуют равномерно в рассматриваемом материале и распределяются по дуге валков;

– максимальное усилие возникает в зоне нейтрального угла;

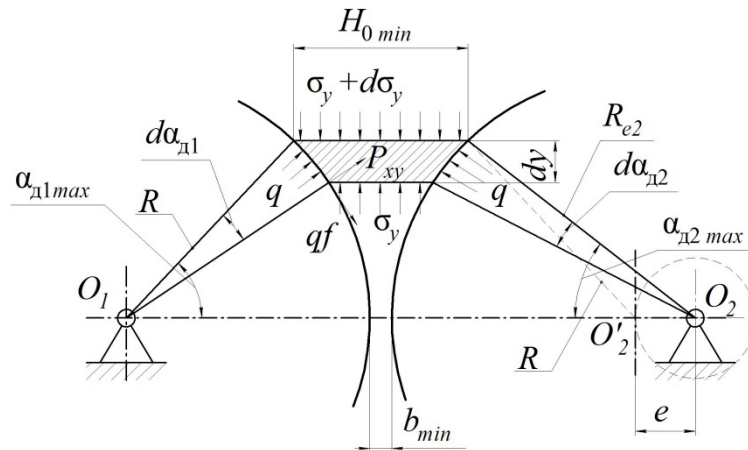


Рис. 1. Схема нагружения элементарного слоя материала при минимальном зазоре

– максимальное усилие возникает при минимальном значении межвалкового пространства.

Выделим элементарный слой материала толщиной  $dy$ , на который действуют осевые нормальные напряжения  $\sigma_y$ , распределенное нормальное усилие на поверхности вала  $q$  и касательная от распределенных усилий  $f q$  (рис. 1).

Рассмотрим половину элементарного слоя и его нагружение (рис. 2).

Составим уравнения равновесия данного элементарного слоя в проекциях на оси  $x$  и  $y$ :

$$\sum F_x = 0;$$

$$q R d\alpha_d \cos \alpha_d + \tau_f R d\alpha_d \sin \alpha_d - \sigma_x dy = 0. \quad (2)$$

$$\sum F_y = 0; \quad \sigma_y h_x - (\sigma_y + d\sigma_y)(h_x + dh_x) + q R d\alpha_d \sin \alpha_d - \tau_f R d\alpha_d \cos \alpha_d = 0. \quad (3)$$

Согласно рисункам 1 и 2 имеем:

$$\sin \alpha_d = \frac{dh_x}{R d\alpha_d}; \quad dy = R d\alpha_d \cos \alpha_d.$$

Подставим эти соотношения в уравнения (2) и (3) с учетом, что  $f q = F_{тр}$ , получаем:

$$q R d\alpha_d \cos \alpha_d + f q R d\alpha_d \sin \alpha_d - \sigma_x R d\alpha_d \cos \alpha_d = 0; \quad (3)$$

$$\sigma_y dh_x + d\sigma_y h_x - q R d\alpha_d \sin \alpha_d + f q R d\alpha_d \cos \alpha_d = 0. \quad (4)$$

Приведем соотношение к виду:

$$q (\cos \alpha_d + f \sin \alpha_d) - \sigma_x \cos \alpha_d = 0. \quad (5)$$

Тогда:

$$q = \frac{\sigma_x \cos \alpha_d}{\cos \alpha_d + f \sin \alpha_d}. \quad (5)$$

Согласно рис. 2 имеем  $q = Pxy$ ,  $dh_x = R \sin \alpha_d d\alpha_d$ , тогда:

$$\sigma_y dh_x + d\sigma_y h_x - P dh_x + F_{тр} \frac{dh_x}{\tan \alpha_d} = 0. \quad (6)$$

Текущее сопротивление слоя частиц можно определить по формуле, выведенной для ПВИ [12] с учетом преобразований для вибровалкового измельчителя:

$$P_i = \frac{0,71 f L \alpha_k \sigma_{сж}}{k_{ан}} \left( \frac{\xi L b_{ср}}{S_r} \right) \times \frac{H_0 \tan \alpha_d}{\Delta h f_T (f_T + \tan \alpha_d)} \left( 1 + \frac{f_T}{\tan \alpha_d} \left( 1 - \frac{2(H_0 - b_{ср})}{H_0} \right) - \frac{(\tan \alpha_d - f_T) \left( \frac{H_0}{h_x} \right) \frac{f_T}{\tan \alpha_d}}{\right), \quad (7)$$

где  $f$  и  $f_T$  – коэффициенты внутреннего и внешнего трения;  $L$  – периметр деформации,  $L = 2(B + b_{ср})$ , мм;  $\alpha_k$  – относительная величина проекций суммарной контактной поверхности разрушаемых тел;  $k_{ан}$  – коэффициент анизотропии;  $\tan \gamma$  – среднестатистическая величина угла наклона площадки контакта анизотропных частиц к трем взаимно перпендикулярным осям координат;  $\xi$  – коэффициент бокового распора;  $S_r$  – площадь вала, м<sup>2</sup>;  $\Delta h$  – деформация слоя материала при его разрушении, м;  $h_x$  – толщина слоя частиц в начале деформации, м.

Анализ выражения (7) показывает, что величина усилия измельчения зависит от физико-механических свойств материалов и геометрии валков.

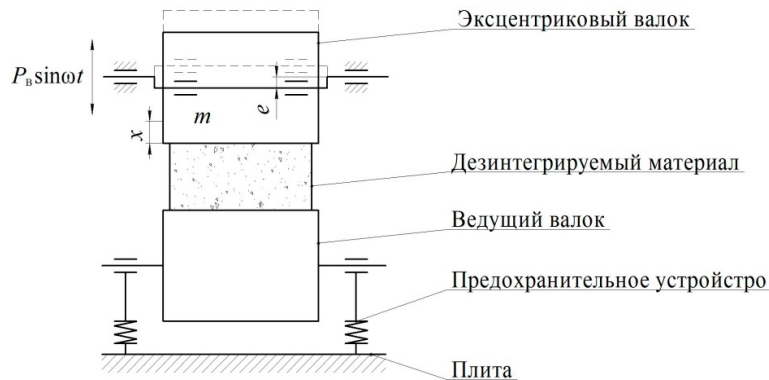


Рис. 3. Модель колебательного движения в горизонтальной плоскости

С другой стороны, усилие от вибрационного воздействия является силой инерции [1]:

$$P_{\text{виб}} = P_B \sin \omega_{\text{эв}} t, \quad (8)$$

где  $P_B$  – возбуждающее усилие, Н;  $\omega_{\text{эв}}$  – угловая скорость эксцентрикового вала, об./мин.;  $t$  – время вибрирования, сек.

$$P_B = m \omega_{\text{эк}}^2, \quad (9)$$

где  $m$  – масса рабочего органа машины (валка), кг;  $\omega_{\text{эк}}$  – угловая скорость колебательного движения эксцентрикового вала, сек.<sup>-1</sup>.

Для анализа процесса уплотнения и деформирования измельчаемого материала эксцентриковым валком вибровалкового измельчителя была составлена модель, отражающая динамику колебательного движения эксцентрикового вала (рис. 3).

При этом при составлении модели принимаются во внимание следующие допущения:

– разрушаемый материал является упруго-вязко-пластичной, однородной средой;

– деформация материала происходит в результате воздействия нормальных нагрузок, возникающих от валка (касательные напряжения не учитываются);

– ведущий валок подпружинен, однако жесткость пружин больше жесткости деформируемого материала.

Дифференциальные уравнения данной колебательной системы:

$$m \ddot{x} = P_B \sin \omega_{\text{эв}} t - P_M(t), \quad (10)$$

где  $x$  – горизонтальное перемещение эксцентрикового вала, м;  $P_M(t)$  – реакция на валок со стороны материала, Н.

Выразим реакцию на валок:

$$P_M(t) = P_B \sin \omega_{\text{эв}} t - m \ddot{x}.$$

Так как данная величина должна быть постоянной на протяжении всего процесса, определим возникающие контактные напряжения:

$$\sigma_K(t) = \frac{P_M(t)}{S_K(t)}, \quad (11)$$

где  $S_K(t)$  – площадь пятна контакта валка с материалом, м<sup>2</sup>.

$$S_K(t) = \frac{D(\alpha_d + \alpha_y)}{2} B = RB(\alpha_d + \alpha_y), \quad (12)$$

где  $\alpha_d$  и  $\alpha_y$  в радианах.

Тогда напряжение можно определить как:

$$\sigma_K(t) = \frac{P_B}{RB(\alpha_d + \alpha_y)} \cdot \sin \omega_{\text{эв}} t - \frac{m}{RB(\alpha_d + \alpha_y)} \cdot \frac{d^2 x}{dt^2}, \quad (13)$$

где  $x$  – абсолютная деформация материала, м или

$$\sigma_K(t) = \frac{P_B}{RB(\alpha_d + \alpha_y)} \cdot \sin \omega_{\text{эв}} t - \frac{m}{RB(\alpha_d + \alpha_y)} \cdot \int_{H_{\text{одеф}}}^{b_{\text{ср}}} H_i dH \cdot \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2}, \quad (14)$$

где  $\varepsilon$  – относительная деформация материала, м.

Согласно проведенному теоретическому исследованию график зависимости изменения контактного напряжения при продвижении материала через рабочее пространство (рис. 4).

Нарастание напряжений зависит от выбора конструктивных и технологических параметров вибровалкового измельчителя, в частно-

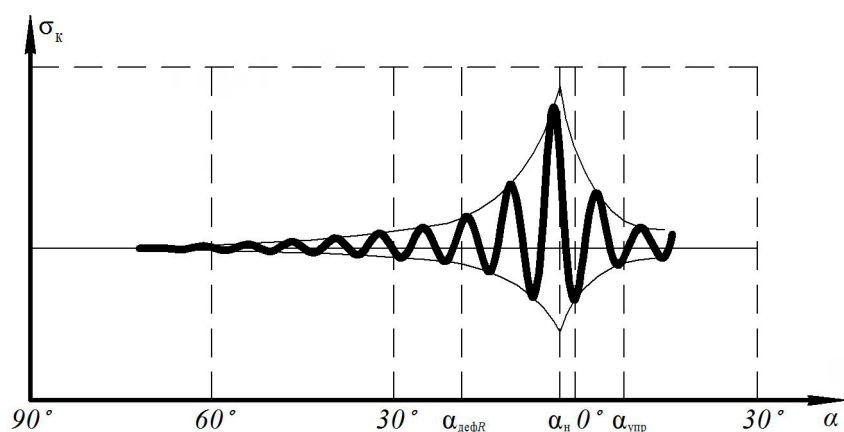


Рис. 4. Изменение контактного напряжения эксцентрикового вала за время его контакта с материалом в рабочем пространстве

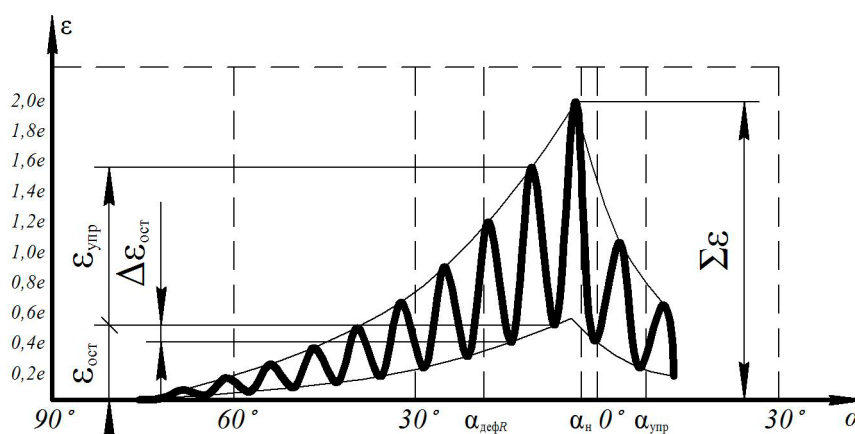


Рис. 5. Изменение деформации материал за время контакта эксцентрикового вала с деформируемым материалом

сти, величины эксцентриситета и частоты вращения эксцентрикового вала.

График, отображающий изменение остаточных деформаций измельчаемого материала за время контакта с эксцентриковым валком (рис. 5), где  $\Sigma \varepsilon$  – полная деформация, мм;  $\varepsilon_{\text{упр}}$  – упругая деформация, мм;  $\varepsilon_{\text{ост}}$  – остаточная деформация, мм;  $\Delta \varepsilon_{\text{ост}}$  – прирост остаточных деформаций материала после каждого силового импульса эксцентрикового вала, мм.

Согласно проведенному теоретическому анализу можно сказать, что с каждым силовым импульсом эксцентрикового вала происходит незначительное увеличение контактного напряжения (рис. 4), а также прирост остаточной деформации (рис. 5). Полная деформация от вибрационного воздействия состоит из упругой и остаточной составляющей деформаций. Прирост остаточной составляющей деформации приводит к увеличению коэффициента уплотне-

ния и служит показателем эффективности процесса деформирования.

Таким образом, совмещение вибрационного и вращательного движения вала вибровалкового измельчителя позволяет увеличить усилие, приходящееся на измельчаемый материал, что интенсифицирует его движение и способствует увеличению производительности измельчителя и степени измельчения материала [1].

#### Библиографический список

1. Дешко Ю. И., Креймер М. Б., Крыхтин Г. С. Измельчение материалов в цементной промышленности. М.: Стройиздат, 1966. 270 с.
2. Griffiths A. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1921. Vol. 221. A 587. P. 163–198.

3. *Моргулис М. Л.* Вибрационное измельчение материалов. М.: Промстройиздат, 1957. 105 с.
4. *Ходаков Г. С.* Тонкое измельчение строительных материалов. М.: Стройиздат, 1972. 238 с.
5. *Акерман Ю. Э.* Справочник по обогащению. М.: Недра, 1982. 387 с.
6. *Колмогоров В. П.* Напряжения, деформации, разрушение. М.: Металлургия, 1970. 229 с.
7. *Зайцев Ю. В., Леонович С. Н.* Прочность и долговечность конструкционных материалов с трещиной. Минск: БНТУ, 2010. 362 с.
8. *Эберхардштайнер Й., Леонович С. Н., Зайцев Ю. В.* Прочность и трещиностойкость конструкционных строительных материалов при сложном напряженном состоянии. Минск: БНТУ, 2013. 522 с.
9. *Сиваченко Л. А., Сотник Л. Л.* Анализ работы подшипниковых узлов эксцентрикового вала вибровалкового измельчителя // Вестн. БарГУ. Сер. Технические науки. 2017. Вып. 5. С. 87–92.
10. *Сотник Л. Л., Сиваченко Л. А.* Исследование влияния отдельных факторов на степень измельченности в вибровалковом измельчителе методом математического планирования эксперимента // Горная механика и машиностроение. 2018. № 1. С. 30–36.
11. *Сиваченко Л. А., Сотник Л. Л., Богданович И. А.* Основы проектирования вибровалкового агрегата для дезинтеграторной обработки минеральных материалов // Научные технологии и инновации: сб. докладов междунар. науч.-практ. конф.: в 12 ч. Ч. 4: Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. Белгород, 2016. С.179–185.
12. *Романович А. А.* Энергосберегающие агрегаты для измельчения материалов цементного производства с анизотропной текстурой: дисс. ... д-ра техн. наук. Белгород, 2014. 398 с.