

УДК 621.926: 622.73

Надутьий В.П., д-р техн. наук, професор
(ИГТМ НАН України)

Титов А.А., канд. техн. наук, ст. науч. сотр.
(Государственное ВУЗ «НГУ»)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ СЕЧЕНИЯ ЗОНЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛА В ДЕЗИНТЕГРАТОРАХ НА ТОЛЩИНУ ЗОНЫ

Надутьий В.П., д-р техн. наук, професор
(ИГТМ НАН України)

Титов О.О., канд. техн. наук, ст. науч. співр.
(Державний ВНЗ «НГУ»)

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ФОРМИ ПЕРЕРІЗУ ЗОНИ ДЕФОРМУВАННЯ МАТЕРІАЛУ В ДЕЗИНТЕГРАТОРАХ НА ТОВЩИНУ ЗОНИ

Naduty V.P., D.Sc. (Tech.), Professor
(IGTM of NAS of Ukraine)

Titov A.A., Ph.D. (Tech.), Associate Professor
(State HEI "NMU")

EXPERIMENTAL RESEARCH OF MATERIAL DEFORMED ZONE'S CROSS-SECTION CONFIGURATION IN DISINTEGRATORS INFLUENCE ON THE ZONE'S THICKNESS

Аннотация. Проведено физическое моделирование деформации слоя тонкодисперсного сыпучего материала между двумя жесткими поверхностями дезинтеграторов. В качестве исходного материала был взят гранит фракции -2+1 мм. Получены экспериментальные зависимости толщины зоны деформирования при сжатии слоя материала между горизонтальными параллельными поверхностями для разных комбинаций длины и ширины зоны. Характер зависимостей отношения толщины зоны к радиусу от отношения длины зоны к радиусу – существенно нелинейный. Установлена линейная зависимость между безразмерными комплексами отношения толщины зоны деформирования к ее радиусу и соотношения данного радиуса к периметру минимального сечения зоны деформирования. Результаты работы позволяют определять параметры зоны деформирования дезинтеграторов с вытянутыми вдоль одного направления рабочими поверхностями, например, щековых дробилок или стержневых мельниц.

Ключевые слова: дезинтегратор, дробилка, мельница, рабочая поверхность, зона деформирования, сыпучий материал.

Введение. Под дезинтегратором будем понимать машину для дробления или измельчения полезных ископаемых, когда технологический процесс подразумевает механическое разрушение кусковых сыпучих материалов. Рассмотрим машины, у которых для деформации слоя материала участвуют одновременно две поверхности, например, как у щековых, конусных, валковых дробилок или шаровых мельниц. При сближении рабочих поверхностей дезин-

тегратора в определенный момент образуется так называемая зона деформирования [1] из материала, который будет подвергаться непосредственному разрушению. Объемом зоны деформирования будем считать объем зажатого между поверхностями материала в момент, соответствующий началу разрушения кусков. Крупные куски материала в этот момент удерживаются в зоне силами трения о рабочие поверхности, как было показано для дробилок [2] или для мельниц [3]. Слой сыпучего материала может удерживаться толщиной более чем в одну частицу за счет сил внутреннего трения в слое [4].

Необходимость определения объема зоны деформирования в элементарном акте дезинтеграции обусловлена тем, что это позволяет в принципе рассчитать энергонапряженность и производительность дезинтегратора, так как известно количество материала, на которое воздействует энергия разрушения.

На сегодняшний день, данный вопрос проработан слабо, больше в части дробления крупных кусков. Для щековых, конусных и валковых дробилок имеется понятия «угла захвата» между плоскостями касательными к рабочим поверхностям, который зависит от коэффициента трения куска о поверхность [2]. Для щековых и конусных дробилок, не превышение угла захвата гарантирует отсутствие выбрасывания одного куска максимальной крупности из рабочей зоны и соблюдение правил безопасности. Для валковых дробилок угол захвата ограничивает максимальную крупность кусков питания.

В случае расположения кусков по толщине более чем в один слой, что соответствует попаданию в рабочую зону, например щековой дробилки, более мелких кусков и их расклиниванию между щеками, между кусками возникают боковые усилия распора, помогающие выталкивать материал из рабочей зоны. В этом случае просто идут на уменьшение угла захвата от расчетных величин, что гарантирует безопасность работы, но не дает количественную оценку процесса.

Более того, имеются машины с эффектом дробления «в слое» [5, 6], где материал намеренно располагается в 3...5 слоев по толщине для повышения селективности дробления и уменьшения выхода лещадных частиц. Процессы же в зонах деформирования между шарами мельниц вообще трудно поддаются описанию, известны только общие моменты [1, 3]. Учет сил бокового распора в сыпучем материале существенно уменьшает расчетный объем зоны деформирования по сравнению с традиционным подходом [4].

Поэтому делаем вывод об актуальности проблемы определения зоны деформирования для дезинтеграции мелких частиц, попадающих между рабочими поверхностями толщиной в несколько слоев.

Цель данной работы – получить экспериментальные зависимости толщины зоны деформирования при сжатии слоя сыпучего материала в дезинтеграторах между горизонтальными параллельными поверхностями для разных комбинаций длины и ширины зоны.

Основная часть.

Исходным материалом является дробленый гранит фракции $-2+1$ мм.

Порция материала насыпалась на нижнюю неподвижную горизонтальную

стальную плиту в виде пространственной фигуры, показанной на рис. 1, *a*, состоящей из двух полуконических и одной призматической части. Угол наклона образующей конуса и призмы соответствует углу естественного откоса сыпучего материала.

Производилось сжатие слоя верхней плитой до момента начала резкого возрастания усилия прессования, что соответствовало формированию зоны деформирования (ЗД). В результате получалась фигура на рис. 1, *б*, имеющая плоскую верхнюю грань. Эту грань будем называть минимальным (поперечным) сечением зоны деформирования, т. к. очевидно, что сечение на нижней поверхности будет выше.

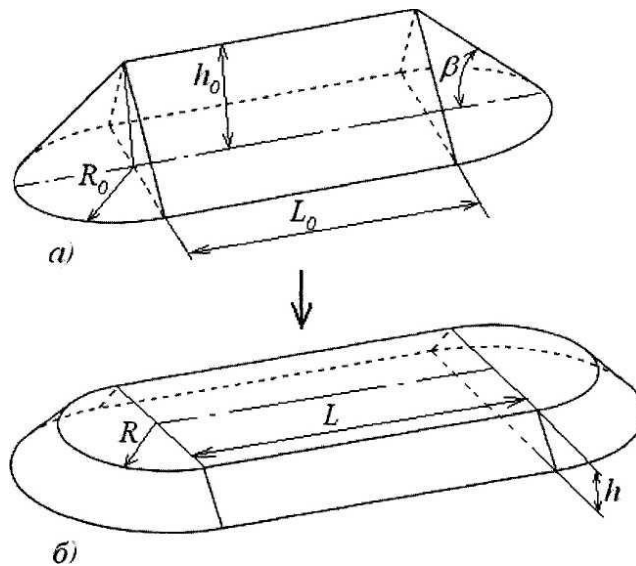


Рисунок 1 – Объем материала: *a*) до сжатия; *б*) после сжатия

При выполнении эксперимента варьировались параметры, показанные на рис. 1, *a*, конкретно начальная высота h_0 , радиус R_0 и длина L_0 . При изменении соотношения (L_0/R_0) форма минимального сечения, полученного после сжатия, варьировалась от круга к овалу, и далее практически соответствовала изображенной на рис. 1, *б*. Данную форму сечения будем считать расчетной в том числе потому, что она повторяет форму основания начальной фигуры на рис. 1, *a*.

После сжатия производились замеры параметров h , R и L , выявлению соотношения между которыми и посвящена данная статья.

Ранее, в работе [4], были проведены исследования для случая сжатия между горизонтальными поверхностями конуса сыпучего материала, что соответствует случаю $L = 0$, для которого установлено соотношение

$$\frac{h}{R} = const. \quad (1)$$

Неизвестная константа является функцией коэффициентов внешнего (о рабочую поверхность) и внутреннего (в слое) трения материала.

Нас интересует, как изменится данное соотношение, если ввести дополни-

тельный фактор – длину зоны деформирования L .

Предварительно сформируем безразмерные комплексы:

$$n = \frac{h}{R}. \tag{2}$$

$$m = \frac{L}{R}. \tag{3}$$

Обработанные экспериментальные данные представим в виде зависимости $n = f(m)$ (рис. 2).

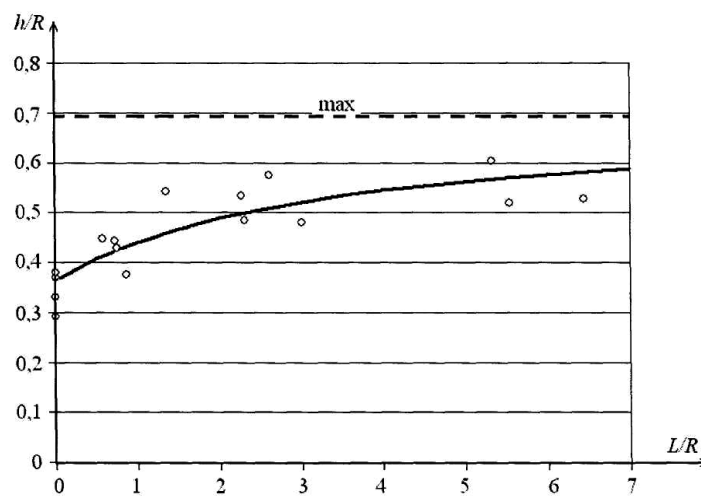


Рисунок 2 – Зависимость $n = f(m)$

Как видим, при увеличении длины зоны деформирования возрастает и ее толщина при постоянном радиусе. Данная зависимость является существенно нелинейной, поэтому для упрощения анализа желательно перейти к другим координатам (рис. 3).

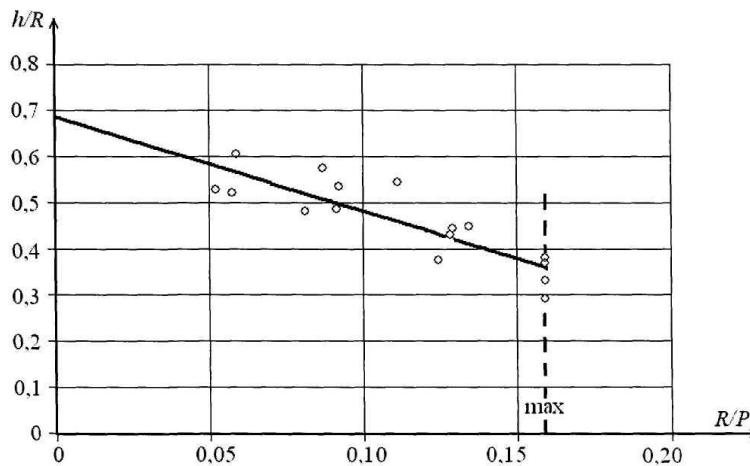


Рисунок 3 – Зависимость $n = f(p)$

Было установлено, что ту же зависимость можно получить в линейных координатах, если вместо величины m ввести безразмерный комплекс

$$p = \frac{R}{P}, \quad (4)$$

где P – периметр минимального сечения, вычисляемый по формуле

$$P = 2 \cdot \pi \cdot R + 2 \cdot L. \quad (5)$$

Штриховая линия на рис. 3 соответствует случаю $L = 0$ с максимально возможным значением $p = 0,16$, при котором материал находится в объемном напряженном состоянии. При $p = 0$ необходимо, чтобы $L \rightarrow \infty$, что соответствует плоскому напряженному состоянию.

Зависимость $n = f(p)$ представим в виде:

$$n = a - b \cdot p, \quad (6)$$

определены значения коэффициентов $a = 0,69$ и $b = 2,05$; аппроксимирующая линия показана на рис. 3.

Преобразовав выражение (6) с учетом (5), получим

$$n = a - \frac{0,5 \cdot b}{\pi + m}, \quad (7)$$

аппроксимирующая кривая приведена на рис. 2.

Рассмотрим предельные случаи:

– при $L = 0$ имеем

$$n = a = const, \quad (8)$$

что соответствует выводам [4];

– при $L \rightarrow \infty$, имеем

$$n = a - \frac{b}{2 \cdot \pi}, \quad (9)$$

что является ординатой асимптоты (см. рис. 2).

Выводы

1. Получены взаимозависимости таких параметров зоны деформирования дезинтеграторов как толщина, радиус и длина для случая сжатия слоя гранита фракции $-2+1$ мм между двумя параллельными плоскостями.

2. Отношение толщины ЗД к ее радиусу находится в линейной зависимости от отношения этого радиуса к периметру минимального сечения ЗД.

3. Получена зависимость относительной толщины зоны деформирования от ее относительной длины, определены эмпирические коэффициенты и предельные значения.

4. Высота зоны деформирования существенно увеличивается при переходе от объемного к плоскому напряженному состоянию сыпучего материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кухарь, А.Г. О закономерностях процесса измельчения в вертикальной вибрационной мельнице // А.Г. Кухарь / Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 1983. – Вип. 32. – С. 44–51.
2. Андреев, С.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. Изд. 3-е, перераб. и доп. / С.Е. Андреев, В.А. Перов, В.В. Зверевич. – М.: Недра, 1980. – 415 с.
3. Труды европейского совещания по измельчению. – М.: Стройиздат, 1966. – 603 с.
4. Анциферов, А.В., Титов, А.А. Определение угла захвата измельчителей тонкодисперсных материалов // Вибрации в технике и технологиях. – 2004. – № 1(33). – С. 28-30.
5. Ревнивцев, В.И. Вибрационная дезинтеграция твердых материалов / В.И. Ревнивцев, Г.А. Денисов, Л.П. Зарогатский, В.Я. Туркин. – М.: Недра, 1992. – 430 с.
6. <http://sgm-eng.ru/o-kompanii/articles/tehnologiya-proizvodstva-kubovidnogo-Shhebenya>

REFERENCES

1. Kuhar, A.G. (1983), "About dependencies of grinding process in a vertical vibrational mill", *Mineral dressing: Resp. int.-dep. sci.-res. col.*, no. 32, pp. 44-51.
2. Andreev, S.E., Perov, V.A. and Zverevich, V.V. (1980), *Drobltniye, izmelcheniye i grokhocheniye poleznykh iskopayemykh* [Crushing, grinding and screening of minerals], Nedra, Moscow, SU.
3. Trudy yevropeyskogo soveshchaniya po izmelcheniyu [Works of European meeting on grinding] (1966), Stroyizdat, Moscow, SU.
4. Antsiferov, A.V. and Titov, A.A. (2004), "Determination of nip angle for grinders of fine materials", *Vibrations in equipment and technologies*, no. 1(33), pp. 28-30.
5. Revnitssev, V.I., Denisov, G.A., Zarogatskiy, L.P. and Turkin, V.Y. (1992), *Vibratsionnaya dezintegratsiya tverdykh materialov* [Vibrational disintegration of hard materials], Nedra, Moscow, RU.
- 6 <http://sgm-eng.ru/o-kompanii/articles/tehnologiya-proizvodstva-kubovidnogo-Shhebenya>

Об авторах

Надутьий Владимир Петрович, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, nadutyvp@yandex.ua.

Титов Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры горных машин и инжиниринга, Государственный ВУЗ «Национальный горный университет», Днепропетровск, Украина, schwingmull@mail.ru.

About the authors

Nadutyu Vladimir Petrovich, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Head of Department of Geodynamic Systems and Vibration Technologies, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, nadutyvp@yandex.ua.

Titov Alexandr Alexandrovich, Candidate of Technical Sciences (Rh.D), Associate Professor in Department of Mining Machines and Engineering, State HEI "the National Mining University", Dnepropetrovsk, Ukraine, schwingmull@mail.ru.

Анотація. Проведено фізичне моделювання деформації шару тонко дисперсного матеріалу між двому жорсткими поверхнями дезінтеграторів. У якості вихідного матеріалу взято граніт фракції -2+1 мм. Отримано експериментальні залежності товщини зони деформування при стисканні шару матеріалу між горизонтальними паралельними поверхнями для різних комбінацій довжини та ширини зони. Характер залежностей відношення товщини зони до радіуса від відношення довжини зони до радіуса – суттєво нелінійний. Встановлено лі-

нійну залежність між безрозмірними комплексами відношення товщини зони деформування до її радіусу та співвідношення даного радіусу до периметру мінімального перерізу зони деформування. Результати роботи дозволяють визначати параметри зони деформування дезінтеграторів із витягнутими уздовж одного напрямку робочими поверхнями, наприклад щокочових дробарок або стрижневих млинів.

Ключові слова: дезінтегратор, дробарка, млин, робоча поверхня, зона деформування, сипкий матеріал.

Abstract. The physical modeling of fine loose material deformation between two rigid surfaces of disintegrators is conducted. The granite particles of size -2+1 mm have been taken as working material. The experimental dependences of deformed zone thickness are obtained during compressing of material layer between parallel surfaces for different combinations of the zone's length and width. The character of dependences between zone's thickness to radius ratio and zone's length to radius ratio is sufficiently non-linear. The linear dependence for dimensionless complexes of deformed zone's thickness to radius ratio and the radius to the perimeter of minimal cross-section ratio is set. The results of work allow to determine the deformed zone parameters of disintegrators with working surfaces extended along one of directions, for example, jaw crushers or rod mills.

Keywords: disintegrator, crusher, mill, working surface, deformed zone, loose material.

Стаття поступила в редакцію 08.01.2016

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук Б.А. Блюссом