

УДК 622.794.3

А. Надь (аспирант)

М. Брожек (проф.)

AGH университет науки и технологии, Краков, Польша

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ НЕРЕГУЛЯРНОЙ ФОРМЫ НА ПРИМЕРЕ КАРБОНАТНЫХ ПОРОД С ПОЛЬСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ KGHM POLSKA MIEDŹ S.A.

В статье представлены результаты исследований 5 классов крупности (от 16 до 45 мм) карбонатных пород из польского медного месторождения на одноосное сжатие. Образцы представляют собой отдельные зерна неправильной формы. Для определения функции распределения прочности использовалась функция Вейбулла.

Ключевые слова: прочность, сжатие, функция распределения Вейбулла, карбонатные породы.

Введение. KGHM Польская Медь Акционерное Общество является одним из крупнейших мировых производителей меди и серебра. По добыче медной руды и производству рафинированной меди комбинат за 2012 год занял 7 позицию в мире (согласно *CRU International, Copper Market Outlook April 2013*); по производству серебра – 1 позицию (1 275 тонны) [1]. Фирма состоит из трех шахт, сырье которых перерабатывается на трех обогатительных фабриках и двух металлургических заводах, на которых идет обработка концентрата, полученного в результате обогащения.

Руда меди состоит из трех основных литологических залежей: песчанники, сланцы и карбонатные породы. Каждая из них имеет различное содержание медных соединений и различную грануляцию минералов. В связи с малой крупностью медных включений необходимым является проведения комплекса мероприятий по обогащению руды, главная задача которых состоит в извлечении медных минералов в концентрат. Первыми и наиболее энергоемкими операциями являются дробление и измельчение руды, с целью доведения исходного сырья до необходимой крупности для последующего обогащения методом флотации.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Выбор соответствующей технологии для обеспечения эффективности процесса обогащения определяется, прежде всего, литолого-петрографическими характеристиками и физическими свойствами сырья, поставляемого на обогатительную фабрику [2]. В процессах обогащения минерального сырья ключевыми, с точки зрения затрат, является передел рудоподготовки на который приходится от 50 до 70 % капитальных вложений и эксплуатационных расходов обогатительной фабрики [3]. В свою очередь, разрушение горных пород - сложный физический или физико-химический процесс, характер развития которого зависит от величины и скорости приложения нагрузки, напряженного состояния объекта, его прочности и структурных свойств [4]. В работе проводятся исследования прочности нерегулярных частиц с целью найти зависимость распределения частиц по крупности от механических свойств сырья.

Анализ исследований и публикаций. Максимальной прочностью обладает гипотетическое твердое тело с бездефектным кристаллическим строением, т.е. тело имеет идеальную или теоретическую прочность. Реальная прочность всегда меньше идеальной из-за наличия в кристаллической решетке дефектов. Горная порода всегда имеет дефекты, которые присущи кристаллическому строению минералов. Вблизи дефектов концентрируются напряжения, а значит и энергия. Наибольшее

влияние оказывают трещины, в результате роста которых происходит разрушение [5]. Дефекты повышают среднее напряжение в теле, что приводит к разрыву связей между ионами (или атомами) и разрушению тела. В связи с этим реальная прочность горных пород на растяжение меньше в $10^2 - 10^4$ раз чем теоретическая [5-6].

Теоретическая прочность твердого тела на растяжение зависит от его кристаллического строения и можно ее описать следующим выражением [7]:

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{\gamma E}{c}} \quad (1)$$

где: σ_t – теоретическая прочность, Па

E – модуль Юнга, Па

γ – свободная поверхностная энергия, Дж/м²

c – постоянная кристаллической решетки.

Согласно А. Гриффитсу [8] прочность на растяжение твердого тела, ослабленного трещиной, имеющей форму линзы длиной $2l$, описывается формулой:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2\gamma E}{\pi l}} \quad (2)$$

В вершине трещин напряжения аккумулируются и способны превышать в несколько раз их средние значения. Гриффитс определил, что трещина поглощает и концентрирует в себе упругую энергию. При росте трещины происходит выгодное природе понижение энергии.

Число микротрещин в образце, как и их длина, являются случайными переменными. Поскольку прочность образца зависит от количества и размера микротрещин, следовательно, она также будет случайной величиной. Совокупное распределение прочности можно выразить используя распределение Вейбулла [9]:

$$P(\sigma) = 1 - \exp \left[-r \left(\frac{\sigma}{\sigma_{sr}} \right)^m \right] \quad (3)$$

где: m – модуль Вейбулла,

σ_{sr} – среднее значение прочности,

r – постоянная, связанная с модулем Вейбулла функцией:

$$r = \Gamma^m \left(1 + \frac{1}{m} \right) \quad (4)$$

Параметры m и σ_{sr} связаны с распределением величины микротрещин. Они определяются экспериментально при дроблении отдельных зерен путем их сжатия с одновременной регистрацией силы разрушения для каждого зерна.

Среднее значение прочности зерна на растяжение связано с модулем Вейбулла. Исследования показали [11], что характер этой зависимости зависит от вида микротрещин.

Постановка задач исследования. Задачей исследования является нахождение функции распределения частиц по размеру и определение зависимости этого распределения от механических свойств материала.

Изложение материала и результаты. Исследования проводились на образцах карбонатных пород главным минералом которых был доломит крупностью 16-45 мм. Пробы были отобраны из шахты Рудная и предварительно раздроблены в щековой дробилке. Затем материал был просеян на ситах, в результате чего было получено 5 узких классов крупности: 16-18 мм, 18-20 мм, 20-25 мм, 25- 31,5 мм и 31-45 мм. В каждом классе крупности был определен средний размер образца D . Образцы с каждого класса крупности раздавливались по отдельности до момента разрушения образца с одновременной регистрацией значения разрушающей силы. В каждом классе крупности было около 100 образцов. Перед проведением экспериментов были отобраны образцы плоской и удлиненной формы.

Весь спектр значений прочности на разрыв для каждого образца в отдельности разделён на несколько узких классов (диапазонов). Для каждого класса, рассчитан выход зерен в данном классе прочности. Результаты этих измерений были использованы для расчета среднего значения прочности и определения распределения прочности.

Прочность горной породы при раздавливании образцов произвольной формы можно рассматривать как условную прочность горной породы на разрыв σ и характеризовать ее отношением разрушающей силы F к сечению разрушаемого образца по формуле [12].:

$$\sigma = \frac{F}{D^2} \quad (5)$$

где: F – разрушающая сила [Н],

D – средний размер зерна до разрушения [м].

Суммированный выход зерен в диапазонах разрушающих сил, рассчитанный по отношению к общей массе пробы, представляет вероятность разрушения или функцию распределения прочности зёрен.

После каждого сжатия отдельного класса крупности было рассчитано распределение прочности раздавливаемых образцов. Графики распределения прочности построены в координатах $\left(\frac{\sigma}{\sigma_{sr}}, P\right)$, где P – функция распределения, σ_{sr} – средняя прочность раздавливаемых образцов в данном классе крупности.

К данным экспериментальным подобрана математическая модель согласно формуле (3). Зависимости, рассчитанные по методу наименьших квадратов, следующие:

а) для класса 31,5-45 мм (рис.1)

$$P(\sigma) = 1 - \exp \left[-1,026 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{sr}} \right)^{2,588} \right]$$

б) для класса 25-31,5 мм (рис.2)

$$P(\sigma) = 1 - \exp \left[-0,936 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{sr}} \right)^{2,789} \right]$$

с) для класса 20-25 мм (рис.3)

$$P(\sigma) = 1 - \exp \left[-0,830 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{sr}} \right)^{3,422} \right]$$

d) для класса 18-20 мм (рис.4)

$$P(\sigma) = 1 - \exp \left[-0,990 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{sr}} \right)^{3,059} \right]$$

e) для класса 16-18 мм (рис.5)

$$P(\sigma) = 1 - \exp \left[-1,000 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{sr}} \right)^{3,733} \right]$$

Общая модель (рис.6) для всех 5 классов крупности имеет вид:

$$P(\sigma) = 1 - \exp \left[-0,946 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{sr}} \right)^{3,045} \right]$$

Совместимость модели с экспериментальным распределением оценивалась при помощи показателя [13]

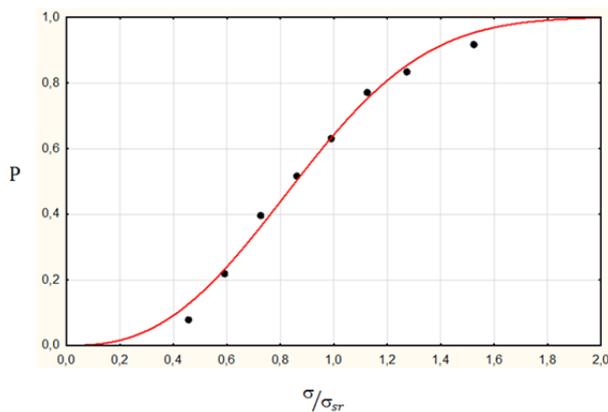


Рис. 1. Функция распределения прочности для образцов неправильной формы класса 31,5-45 мм

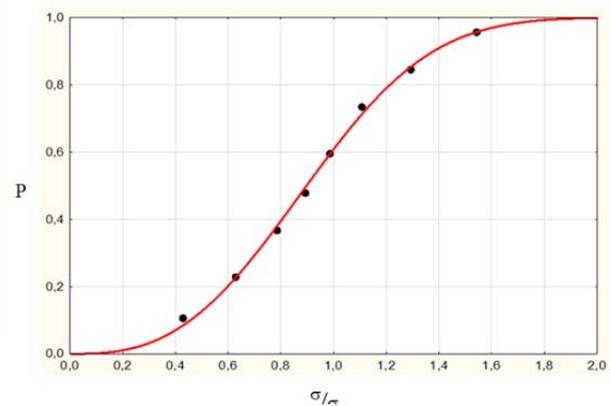


Рис. 2. Функция распределения прочности для образцов неправильной формы класса 25-31,5 мм

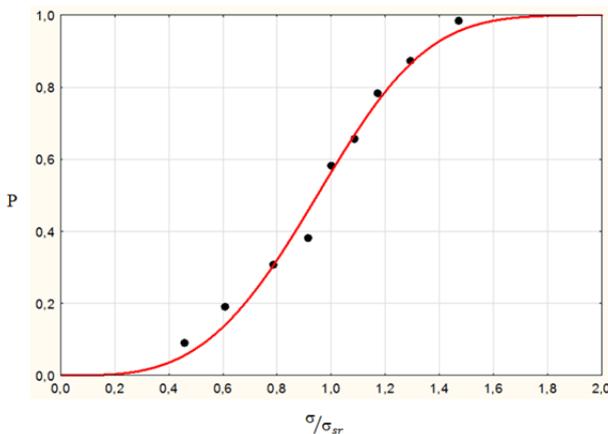


Рис. 3. Функция распределения прочности образцов неправильной формы класса 20-25 мм

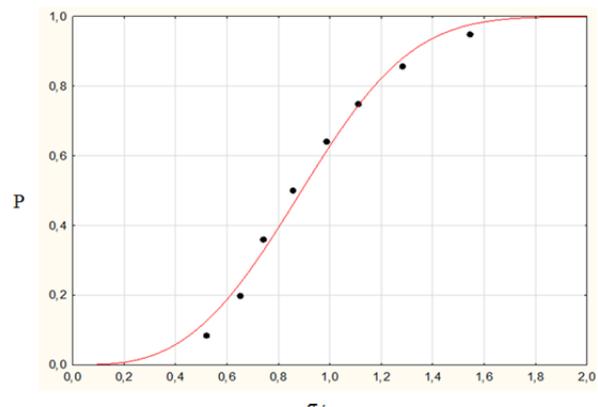


Рис. 4. Функция распределения прочности образцов неправильной формы класса 18-20 мм

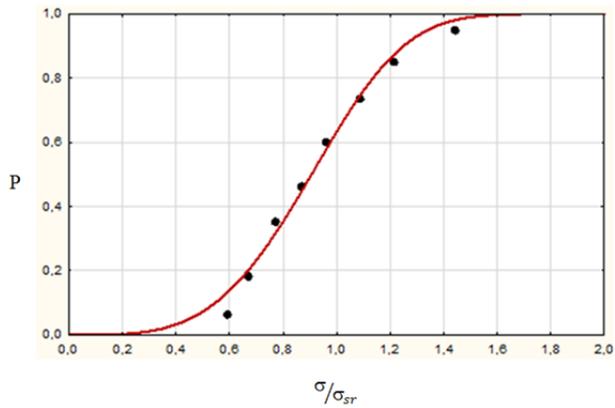


Рис. 5. Функция распределения прочности образцов неправильной формы класса 16-18 мм

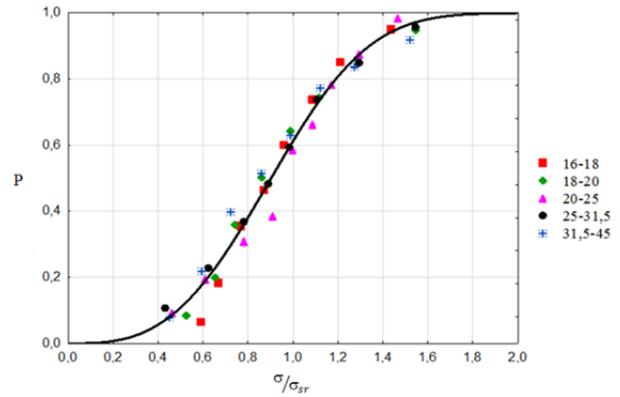


Рис. 6. Функция распределения прочности образцов неправильной формы для 5 классов крупности

$$Q = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - 1)^2}$$

$$x = \frac{\sigma}{\sigma_{sr}} \quad (6)$$

где \hat{x}_i является условным значением прочности, рассчитанным из условия $\hat{P}(\hat{x}_i) = P(x_i)$. Значение \hat{x}_i находится из равенства:

$$\hat{x}_i = \left[-\frac{1}{c} \ln(1 - F) \right]^{1/m} \quad (7)$$

Для 5 классов крупности совместимость модели с экспериментальным распределением имеет показатель:

$$Q = 0,964$$

Для $Q=1$ совместимость модели с данными эксперимента является идеальной. Если показатель $Q>0,95$ совместимость удовлетворительная (хорошая).

Выводы и направления дальнейших исследований

Полученные результаты исследований распределения прочности для образцов неправильной формы карбонатных пород были аппроксимированы при помощи функции распределения Вейбулла. Показатель соответствия модели с экспериментальными данными высокий (выше удовлетворительного), из чего можно сделать вывод что распределение Вейбулла хорошо аппроксимирует распределение прочности нерегулярных зерен на примере карбонатных пород. Дальнейшие исследования направлены на подтверждение данного утверждения для распределения прочности других пород данного месторождения.

Статья написана в рамках гранта 15.11.100.625

Список использованной литературы

1. Электронный ресурс. – Режим доступа: <http://www.kghm.pl>.
2. Tumidajski T. Badania energochłonności procesu mielenia oraz podatności na rozdrabnianie składników litologicznych polskich ryd miedzi / T. Tumidajski // *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*. – 2010. – Т.26. – з.1. – С. 61-72.
3. Баранов В.Ф. О фабрике будущего: Обогащение руд / В.Ф. Баранов. – 2010. – № 5. – С. 41-45.
4. Горная энциклопедия / под редакцией Е. А. Козловского. – М.: Советская энциклопедия, 1984-1991.
5. Протасов Ю.И. Теоретические основы механического разрушения горных пород / Ю.И. Протасов. – Москва: Недра, 1985.
6. Hodakov G.S. Fizika izmelcienia / G.S. Hodakov. – Moskwa: Izd.Nauka, 1972.
7. Cotrell A.H. The mechanical properties of matter / A.H. Cotrell. – New York: J.Wiley and Sons, 1964.
8. Griffith A. A. Phenomena of rupture and flow in solids / A. A. Griffith // *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.* – 1921. – A 221, 163-198.
9. Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability / W. Weibull. // *J. Appl. Mech.* – № 18. – 1951. – P. 293- 297.
10. Jayatilaka A.S. Statistical approach to brittle fracture / A.S. Jayatilaka, K. Trustrum // *J. Mater. Sci.* – № 12. – 1977. – P. 1426 – 1430.
11. Brożek M. Wpływ struktury ziaren mineralnych na ich właściwości wytrzymałościowe na przykładzie wapienia i porfiru. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* / M. Brożek, E. Oruba-Brożek. – 2003. – Т. 19. – з. 3. – С. 91–109.
12. Ильницкая Е.И. Вес и размеры образцов при определении условной прочности горной породы на разрыв. Исследование физико-механических свойств горных пород / Е.И. Ильницкая, М.М.Протождяконов. – Москва: Издательство академии наук СССР, 1962. – С. 15 -26.
13. Doremus R.H. Fracture statistics: A comparison of the normal Weibull and Type I extreme value distribution / R.H. Doremus // *J.Appl.Phys.* – 1983. – № 54. – P. 391-399.

Надійшла до редакції 20.09.2013

О. Надь, М. Брожек

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗРАЗКІВ НЕРЕГУЛЯРНОЇ ФОРМИ НА ПРИКЛАДІ КАРБОНАТНИХ ПОРІД З ПОЛЬСЬКОГО ПІДПРИЄМСТВА KGHM POLSKA MIEDŹ SA

У статті представлені результати досліджень 5 класів крупності (від 16 до 45мм) карбонатних порід з польського мідного родовища на одновісний стиск. Зразки являють собою окремі зерна неправильної форми. Для визначення функції розподілу міцності використовувалася функція Вейбулла.

Ключові слова: міцність, стиск, функція розподілу Вейбулла, карбонатні породи.

A. Nad, M. Brozek

THE STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES OF SAMPLES OF IRREGULAR SHAPES ON THE EXAMPLE OF CARBONATE ROCKS FROM THE POLISH COMPANY KGHM POLSKA MIEDŹ SA

The paper presents the results of investigations of crushing by compression of single particles on lithological type of Polish copper ores like carbonate. The investigations were performed on 5 size fraction from 16 to 45 mm for irregular particles. The tensile strength of particles was determined by uniaxial compression. The strength distribution is approximated by Weibull's distribution and the distribution parameters are independent from the particle size.

Keywords: tensile strength, compression, dolomite, Weibull's distribution function.