© В.А. Таранов, Т.Н. Александрова, 2015

УДК 622.732

В.А. Таранов, Т.Н. Александрова

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ РУДЫ КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Описаны индексы и параметры существующих методик, с помощью которых определяются прочностные свойства руд, дается их краткое описание и основные уравнения. С помощью компьютерных программ проведен анализ базы данных, созданной по результатам лабораторных исследований технологии рудоподготовки зарубежных золотоизвлекательных фабрик. Получены регрессионные уравнения для расчета прочностных и энергетических индексов.

Ключевые слова: рудоподготовка, прочностные свойства руд, индекс работы Бонда, тест падающего груза, ударная и истирающая нагрузка, золотосодержащая руда.

При нынешних темпах добычи и обработки полезных ископаемых уровни затрат на их переработку являются одними из энергоемких и дорогостоящих процессов в мире. Из которых половина приходится на операции подготовки руд к обогащению. Доля капитальных затрат на рудоподготовку, составляет 40–60% от суммарных затрат по фабрике [1]. Примерно такое же процентное соотношение составляют эксплуатационные затраты на рудоподготовку.

В этой связи становится значимой проблема повышения экономичности дробильно-измельчительных переделов, для действующих предприятий и вновь проектируемых. Для действующих предприятий снижение эксплуатационных затрат обычно осуществляется за счет модернизации оборудования, интенсификации его работы и совершенствования технологической схемы. На вновь проектируемых предприятиях, целью является снижение капитальных затрат и обеспечение минимально возможной стоимости переработки 1 т руды. Одним из путей решения данных задач, является совершенствование методов проведения исследований рудоподготовительных операций, с последующей выдачей более надежной информации для проектировщика. Поэтому без соответствующих экспериментов выбор технологической схемы рудоподготовки и оборудования для дробления и измельчения не всегда оправдан.

Оценка прочностных свойств руды – это одна из главных задач проводимых исследований. В настоящее время, одними из самых распространенных в мире исследований в лабораторных условиях, по оценке прочностных свойств руды являются тесты по определению энергетических индексов работы Ф. Бонда и разработанный в JKMRC (Австралия) метод падающего груза JK «Drop-weight» test [2].

Индекс работы дробления – *CWI*, определяет энергию, необходимую для разрушения одиночных частиц руды с широким диапазоном крупности (-80+10 мм), в результате воздействия двух встречных маятников. Таким образом, оценивается прочность разрушения руды, и на основе этого производится расчет дробильного оборудования.

Индекс работы стержневого измельчения – *RWI*. Позволяет рассчитать затраты энергии при измельчаемости руды крупностью -13,2+3,2 мм. В прошлом *RWI* был более востре-

бован, в виду большего распространения стержневого измельчения. На сегодняшний день его чаще используют для расчета технологических схем рудоподготовки не имеющих цикл стержневого измельчения.

Индекс работы шарового измельчения – *BWI*, определяет энергозатраты и измельчаемость руды крупностью менее 3,2 мм, с помощью лабораторной шаровой мельницы. В практике исследований рудоподготовки *BWI* получил самое широкое использование.

Параметры прочности руды – *A*, *b*, *A·b* характеризуют сопротивление руды к ударной нагрузке (тест падающего груза JK DWT). Для выполнения теста необходимо подготовить пять различных фракций (-63 + 53; -45 + 37,5; -31,5 + 26,5; -22,4 + 19; -16 + 13,2 мм), отобранные частицы «правильной» формы собрать в отдельные комплекты, для последовательного разрушения с разной энергией удара.

Параметр истирания руды t_a, который определяется с помощью специальной лабораторной мельницы 300x300 мм с четырьмя 10-миллиметровыми лифтерами. Данный метод определения абразивного самоизмельчения руды (t_a) входит в методику теста падающего груза JK DWT.

Индекс падающего груза DWi, сгенерирован из полученных результатов теста падающего груза. Полученные значения (*A·b*, t_a, *DWi*) по методике JKMRC теста падающего груза, используются в расчетах выбора, производительности и энергопотребления мельниц СИ/ПСИ, а так же являются исходными данными для моделирования циклов рудоподготовки с помощью специально разработанной компьютерной программы JKSimMet.

Индексы и параметры, характеризующие прочностные свойства руды

Обозначение	Размерность	Типовая крупность, мм	Основная формула	Примечания
CWI	кВт·ч/т	от 80 до 10	$CWI = \frac{53,49 \cdot I}{\rho}$	53,49 – постоянная выведенная экспериментально Ф. Бондом; *I* – ударная энергия (Дж/мм); ρ – плотность образца, г/см^3
RWI	кВт·ч/т	от 13,2 до 3,2	$RWI = \frac{68,4}{D^{0,23} \cdot G_{CM}^{0,625} \cdot \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}}\right)}$	68,4; 49,1 – постоянные выведенные экспериментально Ф. Бондом; *D* – размер ячейки контрольного сита; $D_{СМ}$ – измельчаемость материала в стержневой мельнице; $D_{ШМ}$ – измельчаемость материала в шаровой мельнице; F_{80} и P_{80} – крупность фракции 80%-го прохождения соответственно питания и продукта.
BWI	кВт·ч/т	от 3,2 до 0,045	$RWI = \frac{49,1}{D^{0,23} \cdot G_{ШМ}^{0,82} \cdot \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}}\right)}$	
A, *b*	–	от 63 до 13,2	$t_{10} = A\left[1 - e^{(-b \cdot E_{CS})}\right]$	[3]
t_a	–	от 53 до 37,5	$t_a = t_{10}/10$	[3]
DWi	кВт·ч/м^3	от 63 до 13,2	$S = K \cdot F_{80}^a \cdot DW_i^b \cdot \left(1 + c \cdot \left(1 - e^{-dJ}\right)\right)^{-1} \cdot \varphi^e \cdot f\left(A_r\right)$ [4]	

Рассмотренные индексы и параметры, характеризующие прочностные свойства руд сведены в таблицу, в ней так же представлены основные формулы, значения, типовые диапазоны крупности испытуемой руды, согласно методикам тестов. Основными процессами разрушения в данных тестах являются ударные и истирающие нагрузки.

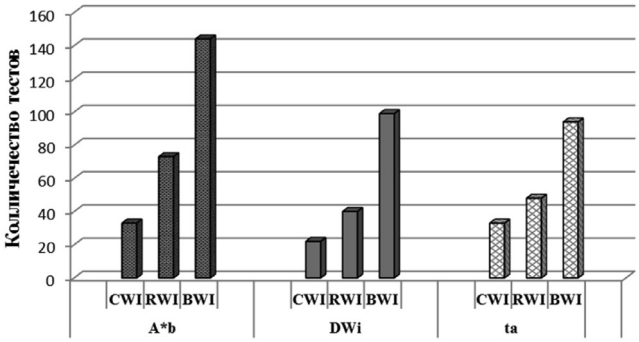

Рис. 1. Количество тестов вошедших в БД

При выполнении теста на установке падающего груза преобладает ударное разрушение (истирающее разрушение испытывается отдельно, t_a), а в шаровой мельнице Бонда происходит преимущественно абразивный тип разрушения с элементами ударной силы. Поэтому, при разрушении крупных кусков на установки падающего груза процесс разрушения зависит от формы и структуры образца, т.е. физико-механических свойств. При выполнении теста Бонда, фракция материала имеет отличительно меньшую крупность, чем в тесте падающего груза (см. таблицу), процесс разрушения начинает происходить на микроуровне, и зачастую руда становится более устойчивой к измельчению, что можно связать в первую очередь с минеральным составом породы. Следовательно, если руда имеет динамику равномерного разрушения при ударе и истирании, то можно утверждать, что существует корреляционная зависимость, с помощью которой, например можно выразить параметры прочности руды ($A{\cdot}b$) через индекс работы Бонда (BWI). Для проведения анализа и выявления математических зависимостей между параметрами тестов падающего груза и энергетических индексов работы Бонда, была создана база данных (БД), лабораторных тестовых исследований технологии рудоподготовки золотосодержащих руд.

Для проведения анализа и выявления математических зависимостей между параметрами тестов падающего груза и энергетических индексов работы Бонда, была создана база данных (БД), лабораторных тестовых исследований технологии рудоподготовки золотосодержащих руд. Источниками пополнения БД были проекты зарубежных золото-извлекательных фабрик 2003–2013 гг. (проанализировано 56 различных проектов). Общее количество выполненных тестов проводимых на одинаковых выборках, приведено на рис. 1.

С помощью компьютерных программ (STATISTICA, STATGRAPHICS), были выполнены различные статистические анализы, построены графики и получены уравнения зависимостей.

Зависимость *A·b* и *BWI*

На рис. 2 представлена зависимость $BWI(A{\cdot}b)$, для 23 пар (11-ти различных проектов). Результаты показывают, что имеет место хорошая корреляция (R^2 = 0,86). Выведено уравнение регрессии степенного вида, выражающего зависимость индекса работы шарового измельчения Бонда от параметров теста падающего груза:

$$BWI = 75{,}88 \cdot (A \cdot b)^{-0{,}458} \qquad (1)$$

Хорошая корреляция на примере 11-ти проектов (рис. 2) связана со схожей структурой и минералогическим

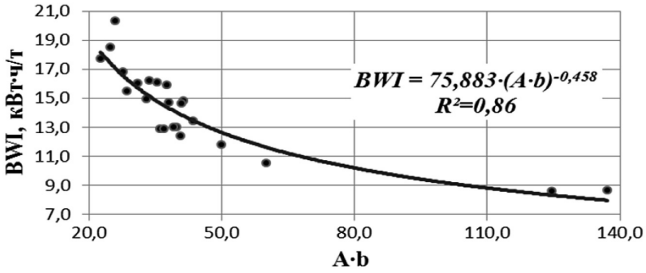

Рис. 2. Зависимость между индексом работы Бонда шарового измельчения (BWI) и параметром разрушения руды (A·b)

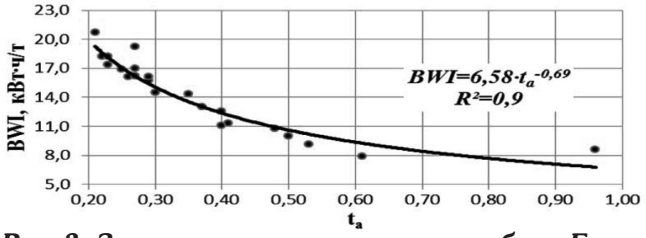

Рис. 3. Зависимость между индексом работы Бонда шарового измельчения (BWI) и параметром истирания руды (t_a)

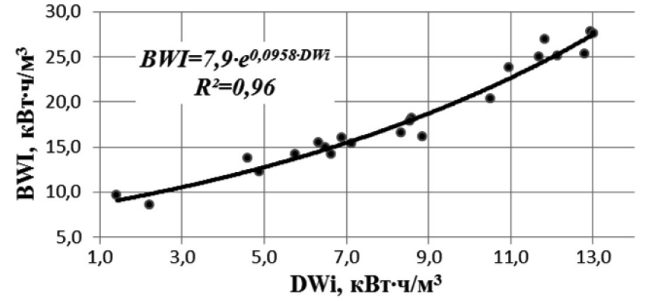

Рис. 4. Зависимость между индексом работы Бонда шарового измельчения (BWI) и индексом падающего груза DWi

составом руд. Полученную зависимость рекомендуется использовать для прогнозирования истирающего разрушения на микроуровне по данным ударного разрушения руды на макроуровне.

Зависимость t_a и *BWI*

Оба значения получаются из тестов измельчения, которые имеют следующие существенные различия: крупность исходной руды и разные процессы измельчения (самоизмельчение и шаровое измельчение). На графике (рис. 3) видна хорошая корреляция ($R^2 = 0,9$) между t_a и *BWI*. Объем данных, для построения данной зависимости, составляет 22 парных теста 11-ти проектов, индексы работы Бонда отобраны из БД, с учетом использования одинакового контрольного сита с размером ячейки (0,075 мм).

Получаем индекс работы Бонда шарового измельчения по результатам теста истирания:

$$BWI = 6,6 \cdot t_a^{-0,69} \qquad (2)$$

Зависимость *DWi* и *BWI*

Зависимость индексов *BWi*(*DWi*) представлена на графике (рис. 4). Из БД выбрано 22 парных теста 6-ти различных проектов. Размер ячейки контрольного сита в тесте Бонда – 0,15 мм. Высокая корреляция, связана со структурой и минералогическим составом руд, таким образом, прочностные свойства руды в двух тестах повлияли на разрушение руды относительно одинаково.

Получаем индекс работы Бонда шарового измельчения по результатам теста падающего груза:

$$BWI = 7,9 \cdot e^{0,096 \cdot DWi} \qquad (3)$$

Оценка прочностных свойств руды имеет различные подходы [2, 5, 6, 7]. При расчете циклов дробления определяется индекс дробимости. Для расчета циклов шарового измельчения, следует определить удельную энергию разрушения и измельчаемость руды с помощью лабораторного теста Бонда шарового измельчения. Гораздо боль-

шего объема информации о прочностных свойствах руды требуется, для расчета циклов СИ/ПСИ, увеличивая тем самым количество различных экспериментов. С помощью полученных уравнений (1–3) возможен расчет нужного индекса или параметра по одному из тестов, что может сократить сроки исследования или использования ограниченного количества образцов руды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андреев Е.Е. Тихонов О.Н.* Дробление, измельчение и подготовка сырья к обогащению. Учебник. – СПб.: ГГТУ, 2007.
2. *Gupta A. Van D.S.* Mineral Processing Design and Operations. An Introduction. ELSEVIER. 2006, pp. 65–76.
3. *Napier-Munn T.J., Morrell S., Morrison R.D.* Mineral comminution circuits. Their operation and optimization. JKMRC, the University of Queensland. Australia. 2005, pp. 76–94.
4. *Morrell S.* Predicting the specific energy of autogenous and semi-autogenous mills from small diameter drill core samples / Minerals Engineering 17. 2004.
5. *Казеннов М.Н.* Методы лабораторных исследований и оценки измельчаемости руд для определения производительности промышленных барабанных мельниц. – М.: Цветметинформация, 1967. – 64 с.
6. *Mcken A., Williams S.* An overview of the small-scale tests available to characterize ore grindability for design purposes // SGS Minerals. Technical bulletin 2005, 06.
7. *King R.P.* Modeling and simulation of mineral processing systems. University of Utah, USA, 2001, pp 127–150. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Таранов Вадим Александрович – аспирант, *e*-mail: taranov.vadim@gmail.com,
Александрова Татьяна Николаевна – доктор технических наук, профессор, *e*-mail: IGD@rambler.ru,
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный».

UDC 622.732

ESTIMATE OF THE STRENGTH PROPERTIES OF THE ORE AS A FACTOR IMPROVEMENT OF THE EFFECTIVENESS OF THE GRINDING PROCESS

Taranov V.A.[1], Graduate Student, *e*-mail: taranov.vadim@gmail.com;
Aleksandrova T.N.[1], Doctor of Technical Sciences, Professor, *e*-mail: IGD@rambler.ru,
[1] National Mineral Resource University «University of Mines», Saint-Petersburg, Russia.

The article describes indexes and parameters of existing techniques used to define mechanical properties of ore and gives its brief description and main equations. Computer programmes helped to analyze the database made up with results of laboratory research of ore dressing at foreign gold processing plants. The regression equations for calculation of mechanical and energy indexes have been obtained.

Key words: ore preparation, the strength properties of ores, Bond work index, drop weight test, impact and abrasive loads, gold ore.

REFERENCES

1. Andreev E.E. Tikhonov O.N. *Droblenie, izmel'chenie i podgotovka syr'ya k obogashcheniyu*. Uchebnik (Crushing, grinding and preparation of raw material for enrichment, Reference book), Saint-Petersburg, GGTU, 2007.
2. Gupta A. Van D.S. *Mineral Processing Design and Operations*. An Introduction. ELSEVIER. 2006, pp. 65–76.
3. Napier-Munn T.J., Morrell S., Morrison R.D. *Mineral comminution circuits. Their operation and optimization*. JKMRC, the University of Queensland. Australia. 2005, pp. 76–94.
4. Morrell S. Predicting the specific energy of autogenous and semi-autogenous mills from small diameter drill core samples. *Minerals Engineering* 17. 2004.
5. Kazennov M.N. *Metody laboratornykh issledovanii i otsenki izmel'chaemosti rud dlya opredeleniya proizvoditel'nosti promyshlennykh barabannykh mel'nits* (Methods of laboratory testing and evaluation of ore grindability to find industrial drum mill capacity), Moscow, Tsvetmetinformatsiya, 1967, 64 p.
6. Mcken A., Williams S. An overview of the small-scale tests available to characterize ore grindability for design purposes. *SGS Minerals. Technical bulletin*. 2005, 06.
7. King R.P. *Modeling and simulation of mineral processing systems*. University of Utah, USA, 2001, pp 127–150.