

взаимной приспособляемости потока и футеровки появятся такие гидроморфологические характеристики потока и такой морфометрический рельеф футеровки, при которых затрачивается минимум энергии (принцип Рэлея-Гельмгольца) и наблюдается минимум производства энтропии (принцип Пригожина). Волновой профиль резиновой футеровки может появиться уже через 10-15 дней от начала эксплуатации в случае если его основы конструктивно заложены изначально; если же футеровка сконструирована неправильно, то признаки волнового износа могут появиться в лучшем случае непосредственно перед её отказом.

2. Непосредственная задача конструкторов заключается в следующем: необходимо выбрать такой материал, такие геометрические формы элементов футеровки и способ раскладки их в барабане, чтобы в течение самого короткого времени эксплуатации мельницы между сегментом загрузки и футеровкой установилось некоторое гармоническое равновесие, соответствующее минимуму потребления энергии; на практике это будет означать следующее: выход мельницы на заданный технологический режим в течение 10-15 дней и минимальный износ элементов футеровки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крюков Д.К. Футеровки шаровых мельниц. – М.: Машиностроение, 1965. – 175 с.
2. Тарасенко А.А., Трубицын М.Н. Логарифмическая спираль направляющая поверхностей трения в барабанных мельницах // Науковий вісник НГАУ. – 1998. – С. 75–80.
3. Дырда В.И., Евенко С.Л., Маркелов А.Е. Резиновые детали технологических машин. – Днепропетровск – Москва, 2011. – 503 с.
4. Шустер Г. Детерминированный хаос. – М.: Мир, 1988. – 240 с.
5. Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах. – М.: Мир, 1979. – 265 с.
6. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. – М.: Мир, 1979. – 512 с.
7. Великанов М.А. Динамика русловых потоков. – Л.: Гидромет. издательство, 1949. – 474 с.

---

УДК 622.23:05459

Дырда В.И., Калашников В.А., Евенко С.Л., Маркелов А.Е.,  
Стойко А., Хмель И.В.

### **ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ ES-ТЕХНОЛОГИЯ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ РУД В ШАРОВЫХ МЕЛЬНИЦАХ С РЕЗИНОВОЙ ФУТЕРОВКОЙ**

Розглядається енергозберігаюча ES-технологія дезінтеграції залізних руд в кульових млинах з гумовою футерівкою.

#### **ENERGY-SAVING TECHNOLOGY OF ORE DISINTEGRATION IN BALL MILLS WITH RUBBER LINING**

Energy-saving technology of disintegration of iron ores in ball mills with rubber lining is considered.

Среди многих проблем современности энергосбережение является приоритетной проблемой практически для всех отраслей промышленности. Благодаря развитию таких новых технологий как информационные системы, компьютеризация, создание новых материалов и методов их обработки и др. во многих отраслях промышленности (например, в автомобильном и железнодорожном транспорте, тракторостроении и т.д.) удалось несколько минимизировать затраты энергии и добиться определённых результатов.

Однако в энергозатратных технологиях, особенно в технологиях горного производства, несмотря на усилия многих исследователей и технологов изменения происходят крайне медленно. Вызвано это, прежде всего, огромными объёмами перерабатываемого материала и спецификой самого горного производства: по мнению В. Вернадского в двадцатом веке деятельность человека по добыче и переработке минерального сырья стала соизмерима с деятельностью геологических

процессов на Земле. Связано также и с тем фактом, что в большинстве случаев дезинтеграции минерального сырья используются традиционные технологии, которые за последние сто лет в смысле энергосбережения изменились несущественно.

В конечном итоге все существующие технологии рудоподготовки и обогащения сводятся к получению такого продукта (на сегодняшний день для шаровых мельниц это класс – 0,056 мм и меньше), который соответствует дальнейшим процессам извлечения требуемых компонентов с минимальными энергетическими затратами.

В настоящей статье нет необходимости развивать эту популярную тему, достаточно лишь подчеркнуть, что в горной промышленности Украины обогатительному переделу подвергается свыше 100 млн. т железной руды в год; при этом на дезинтеграцию руд как наиболее трудоёмкий процесс приходится 50-70 % энергозатрат, капитальных и эксплуатационных расходов. Поэтому в новом тысячелетии обогатительные фабрики прилагают большие усилия для минимизации капитальных вложений и эксплуатационных затрат на тонну перерабатываемой руды. С этой целью во всей производственной цепочке используют современные достижения механики и технологии.

Для горно-обогатительных комбинатов при современном ухудшении условий разработки месторождений полезных ископаемых, необходимости вовлечения в переработку руд с пониженным содержанием полезного компонента и, следовательно, увеличения объёмов переработки исходного продукта, весьма важным является повышение производительности отделений рудоподготовки и, прежде всего, отделений измельчения. В себестоимости железорудного концентрата, например, энергозатраты на измельчение руды в мельницах составляют более 50 %.

По мнению ведущих мировых фирм в ближайшие 20 лет не предусматривается более эффективных способов дезинтеграции минерального сырья, чем измельчение в барабанных мельницах.

Одним из способов решения проблемы энергосбережения в шаровых мельницах (безусловно наряду с совершенствованием технологических схем) является создание новой технологии измельчения руды, при которой минимизация энергозатрат достигается за счёт такого взаимодействия загрузки и элементов футеровки, при котором затрачивается минимум энергии (принцип Рэлея – Гельмгольца) и соблюдается принцип минимума производства энтропии (принцип Пригожина). Такое гармоническое взаимодействие достигается благодаря использованию новых оригинальных конструкций резиновых футеровок, известных в практике как «Плита – Волна», «G.M – Волна» и «Плита – Лифтер – Волна». Более подробно динамика волнового взаимодействия системы «загрузка – футеровка» рассмотрена в статье настоящего сборника [1].

Известно, что начиная со середины прошлого века основной тенденцией развития барабанных мельниц полусамоизмельчения, самоизмельчения и шаровых было увеличения их геометрических размеров: диаметра барабана и его длины. Этому немало способствовали новые конструкции привода, опорных подшипниковых узлов, акустической аппаратуры контроля уровня загрузки и новых конструкций защитных футеровок.

Уже в начале XXI века компания Metso Minerals установила в Австралии мельницу полусамоизмельчения диаметром барабана 12,2 м и длиной 6,71 м; шаровые мельницы этой компании с центральной разгрузкой диаметром 7,62 м и длиной

12,2 м установлены в Чили [2]. Мельницы самоизмельчения диаметром 10,5 м сегодня не редкость и успешно работают на многих предприятиях, например, мельница ММС – 10,5/5,6 для дезинтеграции алмазосодержащих руд на предприятии «Алроса» [3].

Такая тенденция укрупнения габаритов мельниц была вызвана потребностью промышленности для более экономичной переработки больших объёмов руд, так как традиционные технологические схемы всех стадий измельчения вынуждены использовать большое количество линий измельчения, для чего необходимы довольно крупные капитальные и эксплуатационные затраты.

Современные возможности расчёта, конструирования и изготовления барабанных рудоизмельчительных мельниц (в том числе такие новые технологии как: методы и обработки крупногабаритных изделий, новые марки сталей и сплавов, новые методы контроля качества изготавливаемых деталей и т.д.) позволяют создавать мельницы больших диаметров и в основном удовлетворять требованиям современных технологий.

Вместе с тем, нерешённой, или частично решённой, остаётся проблема защитных футеровок. Используемые традиционные конструкции металлических футеровок в смысле долговечности и эксплуатационных затрат не всегда соответствуют принятым технологиям измельчения. Так, в крупногабаритных мельницах полусамоизмельчения для интенсификации процесса дезинтеграции руд стали применять стальные шары диаметром 100 и 125 мм, что вызвало повреждение металлической футеровки. Использование в качестве более качественных сплавов не гарантировало отсутствие риска отказа; к тому же использование высоколегированных износостойких сталей экономически не всегда целесообразно [4].

Вместе с тем, на сегодняшний день мельницы (в основном барабанные – шаровые, полусамоизмельчения и самоизмельчения) в смысле оптимального конструирования достигли некоторого предела и дальнейшее их совершенствование возможно преимущественно за счёт улучшения технологических схем и качества футеровки. Футеровка не только защищает барабан от износа и динамических нагрузок, но и непосредственно влияет на процесс измельчения [3].

Известно, что энергоёмкость разрушения горных пород прямо пропорциональна квадрату прочности и обратно пропорциональна модулю упругости. Известно также, что предел прочности породы на сжатие примерно в 7-10 раз больше предела прочности на сдвиг. Таким образом, если рассматривать физическую сущность процесса разрушения, то в технологии измельчения необходимо соблюдать следующий принцип: разрушение горной породы должно осуществляться за счёт создания преимущественно сдвиговых напряжений.

Реализовать такие сдвиговые напряжения можно в основном за счёт конструкции футеровки, за счёт её морфометрических параметров и рациональной укладки элементов в барабане мельницы. Важную роль играет также материал футеровки, который должен обладать высокой прочностью, износостойкостью и большой диссипацией энергии. Наиболее подходящим материалом является резина, в том числе и в сочетании с металлом.

Резиновые футеровки, применяемые в мельницах с шестидесятих годов прошлого века, стали не только конкурентоспособными, но и по многим параметрам превосходят металлические. В крупных мельницах самоизмельчения типа ММС-10,5/5,6 и на шаровых мельницах второй и третьей стадии измельчения резиновая футеровка оказалась более эффективной и долговечной, чем металлическая [1-5].

В последние годы резинометаллическую футеровку стали использовать и на мельницах первой стадии измельчения. Так, например, на СевГОКе (г. Кривой Рог, Украина) при измельчении крепких железных руд на шаровой мельнице диаметром 3,6 м с шарами диаметром 100 мм резинометаллическая футеровка «G.M-волна» (изготовитель ООО «ВАЛСА-ГТВ») показала довольно хорошие результаты как по технологическим показателям, долговечности и надёжности (отсутствия внезапности отказа), так и по низким эксплуатационным затратам монтажно-демонтажных работ: снизилось потребление электроэнергии; на 5 % снизился удельный расход мелющих тел; прирост готового класса продукта увеличился на 10-12 % [3].

Следует подчеркнуть, что при сравнении резиновых и металлических футеровок важную роль играют критерии оценки их эксплуатационных качеств. Суммируя мировой опыт в этой проблеме можно отмерить наиболее важные критерии оценки:

- время работы футеровки до отказа ( $t^*$ , ч);
- время работы футеровки до отказа в объёме перерабатываемого сырья, т;
- потеря веса футеровки за час работы;
- потеря веса футеровки на тонну перерабатываемого сырья;
- потеря веса футеровки на единицу затраченной энергии;
- прирост готового класса (-0,056 мм), %;
- удельный расход электроэнергии, кВт/т. руды;
- дополнительные критерии: трудозатраты для установки новой и удаления отработавшей футеровки; потерянная производительность мельницы во время простоя при монтажно-демонтажных работах по замене футеровки.

Мировой опыт свидетельствует: на сегодняшний день резиновые футеровки благодаря своим уникальным свойствам – высокой долговечности и надёжности, большой диссипации энергии резины, высокой износостойкости и т.д. – имеют явное преимущество перед металлическими. Среди конструкций резиновых футеровок на рынке услуг наиболее востребованными являются футеровки производства ООО «Валса-ГТВ» (г. Белая Церковь, Украина) – «Плита – Волна», «G.M.-Волна», «Плита – Лифтёр» и другие (более шестидесяти видов различных футеровок для всех мельниц всех стадий измельчения). Благодаря своим морфометрическим параметрам такие футеровки при разрушении минерального сырья, особенно на стыке «загрузка – футеровка», позволяют реализовать преимущественно сдвиговые напряжения.

Применение таких футеровок позволило создать новую энергосберегающую ES-технология (ES-Technology – Energy Saving Technology) измельчения руд в шаровых мельницах. Благодаря этой технологии для мельницы МШЦ 3,6×5,5 второй и третьей стадии измельчения железных руд получены следующие результаты: прирост готового класса увеличился на 17-29 %; расход мелющих тел снизился на 10 %; удельный расход электроэнергии в целом на технологическую секцию снизился на 10-12 %. Так, например, по сравнению с металлическими футеровками самофутерующая резиновая футеровка «Плита – Волна» на шаровых мельницах 2 и 3 стадии измельчения позволила:

- снизить массу комплекта футеровки более чем в 3-5 раз и тем самым повысить срок службы опорных подшипников, снизить эксплуатационные затраты на монтажно-демонтажные работы по замене изношенной футеровки и уменьшить риск несчастных случаев;
- в 2-3 раза снизить шум;

- на 3-5 % повысить коэффициент использования мельниц (резиновая футеровка по сравнению с металлической имеет меньшую толщину);
- обеспечить заданную производительность мельницы уже с первых часов работы;
- снизить расход мелющих тел на 6-10 %;
- уменьшить потребление электроэнергии на 7-9 % (в целом на технологическую секцию на 10-12 %);
- увеличить срок службы на 80-150 %;
- увеличить продолжительность межремонтных циклов в два раза;
- на 3-5 % повысить коэффициент использования мельниц: резиновая футеровка по сравнению с металлической имеет меньшую толщину;
- на 25-30 % сократить время простоев мельниц для планового и непланового ремонтов;
- увеличить прирост готового класса продукта (-0,056 мм) на 17-29 % (при использовании металлической футеровки прирост готового класса продукта 10-12 %).

Помимо этого:

- при использовании резиновой футеровки отсутствует утечка пульпы;
- металлическая футеровка требует частого осмотра, подтяжки болтов и ремонта; при использовании резиновой футеровки болты не требуют подтяжки.

В качестве примера в табл. 1 приведены результаты сравнительных испытаний мельниц МШЦ 3,6×5,5 второй и третьей стадии измельчения технологических секций РОФ-1 ПАО «СевГОК» (г. Кривой Рог, Украина) с различными типами футеровок: металлической шарошипового профиля и резиновых «Плита – Волна» и «Плита – Лифтёр» производства ООО «Валса-ГТВ» (испытания 2009 – 2012 г.г.).

Таблица 1

Технологические показатели	Стадия измельчения	Металлическая футеровка шарошипового профиля	Резиновая футеровка «Плита – Волна»	Резиновая футеровка «Плита – Лифтёр»
Прирост готового класса (-0,056 мм), %	2	23,8-24,5	28,7-28,9	28,7-28,9
	3	10,7-11,8	17,20	10,7-11,8
Удельный расход электроэнергии**, кВт/т руды	2	5,727	5,349	5,50
	3	6,370	5,890	5,92

\*\*Как видно, удельный расход электроэнергии на мельницах с резиновой футеровкой «Плита – Волна» за весь период испытаний по сравнению с металлической футеровкой ниже: во второй стадии измельчения на 7,1 %, в третьей стадии измельчения на 7,46 %. Помимо этого, применение резиновых футеровок в технологических схемах рудоподготовки позволило: снизить удельный расход мелющих тел на 10 % и снизить удельный расход электроэнергии в целом на технологическую секцию на 10-12 %.

Полученные результаты хорошо согласуются с данными других предприятий. Так, например, по данным компании «Metso Minerals» [2, 4, 5] при измельчении золотосодержащих руд в шаровой мельнице замена хромо-молибденовой футеровки на резинометаллическую «Poly-Met» позволила: повысить производительность мельницы в основном за счёт уменьшения времени на замену изношенной футеровки; снизить на 5 % расходы на электроэнергию; уменьшить расход шаров; снизить расходы на монтажно-демонтажные работы; уменьшить травматизм.

Следует подчеркнуть, что для шаровых мельниц затраты на футеровку являются только малой частью общей стоимости процесса измельчения в сравнении со стоимостью измельчаемой среды и объёмом перерабатываемого материала. Поэтому сегодня становится выгодным выбрать оптимальную конструкцию резиновой футеровки, обеспечивающей требуемый прирост готового класса, снижение энергопотребления и расход шаров, чем делать ставку только на стоимость футеровки.

## Выводы

1. Для современных горно-обогатительных комбинатов при повсеместном ухудшении качества полезных ископаемых и необходимости более тонкого измельчения минерального сырья (до класса 40 мкм и ниже) весьма важным является повышение производительности отделений измельчения и уменьшение затрат на единицу перерабатываемой продукции.

2. Основные составляющие этой проблемы – усовершенствование конструкций мельниц и применение рациональных технологических схем – достигли некоторого предела.

3. Мировая практика показала [2-5], что снижение энергоёмкости процесса измельчения и повышение производительности мельниц (шаровых, самоизмельчения и полусамоизмельчения) как по питанию, так и по готовому классу достигается преимущественно за счёт использования резиновых и резинометаллических футеровок.

4. Конструкции резиновых и резинометаллических футеровок (прежде всего, «Плита – Волна» и «Г.М.-Волна» – обе производства ООО «ВАЛСА-ГТВ») благодаря своим морфометрическим параметрам позволили создать новую энергосберегающую ES-технология (ES-Technology) измельчения руд в шаровых мельницах.

5. Пятилетний опыт применения ES-технологии более чем на десяти предприятиях (примерно 70 мельниц различного назначения) показал явные преимущества новых конструкций резиновых и резинометаллических футеровок по сравнению как с металлическими футеровками, так и резиновыми футеровками, например, «Плита – Лифтёр». Так, например, на СевГОКе на второй и третьей стадии измельчения достигнуты следующие положительные результаты: прирост готового класса увеличился на 17-29 %; расход мелющих тел снизился на 10 %; удельный расход электроэнергии в целом на технологическую секцию снизился на 10-12 %.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дырда В.И., Калашников В.А., Стойко А., Хмель И.В. Динамическая модель волнового абразивно-усталостного разрушения резиновой футеровки в барабанных мельницах // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. – 2012. – Вып. 106.
2. Стюарт М. Джонс, Витас Свалбонас. Крупногабаритные мельницы компании Metso Minerals // Горная промышленность. – 2004. – № 6.
3. Дырда В.И., Евенко С.Л., Маркелов А.Е. Резиновые детали технологических машин. – М.- Днепропетровск, 2011. – 503 с.
4. Романов А.П., Колосай Г.Б., Ермаков Д.В., Колтунов А.В. Модернизация технологии измельчения руд на ГОКе «Кубака» // Горная промышленность. – 2004. – № 5.
5. Klas-Goran Eriksson, Gunder Marklund, Гребенешников А.П., Фищев В.Ю. Развитие систем мельничных футеровок // Горная промышленность. – 2010. – № 1.

Булат А.Ф., Дырда В.И., Лисица Н.И., Новикова А.В.,  
Лисица Н.Н., Немчинов Ю.И., Хавкин А.К., Марьенков Н.Г.,  
Жарко Л.А.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ ЗДАНИЙ НА ОСНОВЕ РЕЗИНО-МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЕЙСМОЗАЩИТНЫХ БЛОКОВ**

У статті наведені результати експериментальних досліджень по визначенню фактичних жорсткісних та дисипативних характеристик гумометалевих сейсмозахисних блоків.

### **EXPERIMENTAL RESEARCH OF BUILDINGS SEISMOINSULATION SYSTEM ON THE BASIS OF RUBBER-METAL SEISMOPROTECTING BLOCKS**

The results of experimental research on determination of actual stiffness and dissipation characteristics of rubber-metal seismoprotecting blocks are presented.

В последние 17-20 лет (после разрушительных землетрясений в Армении, 1988 г. и особенно в Японии, 1995 г.) сейсмоизоляция используется при строительстве многоэтажных зданий и мостов во многих странах. В г. Осака, Япония, построено сейсмоизолированное здание высотой 50 этажей.

Сейсмоизоляция – это перспективное направление, которое развивается в последние годы в разных странах. В России, например, на 2010 г. построено уже более 300 сейсмоизолированных зданий и более 70 сейсмоизолированных мостов. В последние годы все большее число сейсмоизолированных зданий, мостов и других сооружений возводятся в различных странах на разных континентах. Наибольшее применение сейсмоизоляция получила в Японии, Китае, США, РФ, Канаде, Армении, Новой Зеландии и Италии. Широкое распространение при реконструкции и возведении новых зданий получили системы сейсмоизоляции на основе РСБ.

В Украине данное направление совершенно не достаточно, что связано как с отсутствием рекомендаций в нормах по сейсмостойкому строительству, так и с необходимостью экспериментальной проверки систем сейсмоизоляции на натуральных фрагментах зданий.

Согласно норм Украины ДБН В.1.1-12:2006 и Еврокода 8 при проектировании зданий, оснащённых сейсмоизоляцией, необходимо, помимо спектрального метода расчёта, выполнять прямой динамический расчёт с использованием инструментально зарегистрированных акселерограмм расчётных землетрясений на площадке строительства.

Основное различие между деформированием конструкций неизолированного здания и сейсмоизолированного здания с применением резинометаллических сейсмоизолирующих блоков (РСБ) заключается в существенном различии относительных горизонтальных перемещений междуэтажных перекрытий при землетрясении. Вследствие более высокой горизонтальной жёсткости этажей верхнего строения здания по сравнению с горизонтальной жёсткостью сейсмоизолирующих блоков, относительные горизонтальные перемещения перекрытий этажей, расположенных выше сейсмопор системы сейсмоизоляции, существенно ниже по сравнению с перемещениями здания без сейсмоизоляции.

Значительные допустимые (равные высоте сейсмоизолирующего блока) горизонтальные перемещения верха РСБ обеспечиваются физическими свойствами резиновых элементов. В настоящее время наибольшее распространение получили