

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ГЕОТЕХНІЧНОЇ МЕХАНІКИ
ім. М.С. Полякова

Геотехнічна механіка
Геотехническая механика
Geo-Technical Mechanics

МІЖВІДОМЧИЙ ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

Головний редактор академік НАН України А.Ф. Булат

Збірник засновано в 1993 році

Випуск 133

Дніпро • 2017

УДК 622.02:539.3

Затверджено до друку Вченою Радою Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України (протокол № 8 від 21.06.2017 року).

Редакційна колегія:

головний редактор – академік НАН України *А.Ф. Булат*;
заступники головного редактора – чл.-кор. НАН України *О.І. Волошин*;
д-р техн. наук *О.П. Круковський*;
відповідальний секретар – д-р техн. наук *В.Г. Шевченко*.

Члени редакційної колегії:

д-р геол. наук *В.А. Баранов*; д-р геол. наук *К.А. Безручко*; д-р техн. наук *Б.О. Блюсс*; д-р техн. наук *Л.М. Васильєв*; д-р геол.-мінерал. наук *П.Ю. Гожик* (Інститут геологічних наук НАН України, директор інституту); д-р техн. наук *В.І. Дирда*; чл.-кор. НАН України *Е.І. Єфремов*; д-р техн. наук *Є.С. Лапшин*; д-р техн. наук *С.П. Мінеєв*; д-р техн. наук *В.П. Надутий*; д-р техн. наук *Т.А. Паламарчук*; д-р геол. наук *Л.І. Пимоненко*; д-р геол. наук *В.Ф. Приходченко* (Державний ВНЗ «Національний гірничий університет» МОН України, зав. кафедри геології та розвідки родовищ корисних копалин); д-р геол. наук *В.С. Савчук* (Державний ВНЗ «Національний гірничий університет» МОН України, професор кафедри геології та розвідки родовищ корисних копалин); д-р техн. наук *Є.В. Семененко*; д-р техн. наук *С.І. Скіпочка*; д-р техн. наук *К.К. Софійський*; д-р техн. наук *М.С. Четверик*; д-р техн. наук *Г.О. Шевченко*; д-р техн. наук *А.О. Яланський*.

Іноземні члени редакційної колегії:

д-р техн. наук *С.Д. Вікторов* (Інститут проблем комплексного освоєння надр Російської академії наук, Російська Федерація); д-р геол.-мінерал. наук *Б.І. Журбицький* (Всеросійський науково-дослідний геологорозвідувальний інститут вугільних родовищ, Російська Федерація); д-р техн. наук *Ю.П. Морозов* (Федеральна державна бюджетна освітня установа вищої професійної освіти Уральський державний гірничий університет, Російська Федерація); д-р техн. наук *Л.С. Шамганова* (Інститут гірничої справи ім. Д.А. Кунаєва Національної академії наук Республіки Казахстан, Республіка Казахстан).

Редактор видання (Print) д-р техн. наук *Т.В. Бунько*
Редактор видання (Online) канд. техн. наук *І.М. Слащов*

У збірнику представлені результати наукових досліджень в галузі динаміки та міцності, механіки еластомерів, безпеки складних технічних систем та проблем стійкого розвитку.

Для наукових працівників, аспірантів та студентів старших курсів вищих учбових закладів України.

Адреса веб-сторінки збірника: www.geotm.dp.ua

Рецензенти: Б.О. Блюсс, д-р техн. наук, професор
В.П. Франчук, д-р техн. наук, професор

УДК 622.23:05459

Калашников В.А., инженер,
Головко Л.Г., инженер,
Стойко А.В., инженер
(ООО «Валса-ГТВ»)

Дырда В.И., д-р техн. наук, профессор
(ИГТМ НАН Украины),

Хмель И.В., канд. техн. наук
(ЧАО «СевГОК»)

ДЕЗИНТЕГРАЦИЯ ЖЕЛЕЗНОЙ РУДЫ В ШАРОВЫХ МЕЛЬНИЦАХ С РЕЗИНОВОЙ ФУТЕРОВКОЙ¹

Калашніков В.О., інженер,
Головко Л.Г., інженер,
Стойко О.В., інженер
(ТОВ «Валса-ГТВ»)

Дирда В.І., д-р техн. наук, професор
(ІГТМ НАН України),

Хмель І.В., канд. техн. наук
(ПАТ «ПівніГЗК»)

ДЕЗИНТЕГРАЦІЯ ЗАЛІЗНОЇ РУДИ В КУЛЬОВИХ МЛИНАХ З ГУМОВОЮ ФУТЕРОВКОЮ

Kalashnikov V.A., M.S (Tech.),
Golovko L.G., M.S (Tech.),
Stoiko A.V., M.S (Tech.)
(Valsa-GTVLtd.)

Dyrda V.I., D. Sc. (Tech.), Professor
(IGTMNASofUkraine),

Khmel I.V., Ph. D. (Tech.)
(PJSC «SevGOK»)

DISINTEGRATION OF IRON ORE IN BALL MILLS WITH RUBBER LINING

Аннотация. Со второй половины прошлого века в качестве защитных футеровок стали применять резину, чему способствовали её уникальные свойства. Одной из ведущих фирм в области создания и поставки резиновых футеровок для всех существующих типов шаровых мельниц стало предприятие ООО «Валса-ГТВ» (г. Белая Церковь, Украина). Этому способствовало следующее: наличие высокотехнологического современного оборудования, разработка оптимальных конструкций элементов футеровок, специальные марки резин и профессиональное сопровождение эксплуатации мельниц с футеровкой предприятия. Важным при этом являлось также использование фундаментальных достижений в области динамики мельниц и механики резины. Созданная теория волнового абразивно-усталостного износа резиновых футеровок, методы их расчёта и методы укладки элементов в барабане позволили механикам и технологам создать футеровки типа «Волна» (на рынке услуг «Плита-Волна», «Плита-Лифтёр-Волна», «G.M-Волна» и «Плита-Н-Волна»). Излагается закономерность волнового износа резиновой

¹ © Калашников В.А., Головко Л.Г., Стойко А.В., Дырда В.И., Хмель И.В., 2017

футеровки при её взаимодействии с внутримельничной загрузкой. Показано, что рельеф футеровки находится в определённой зависимости от структуры потока и является отпечатком структурных образований его турбулентности; образующиеся при этом новые формы поверхности футеровки непосредственно связаны с пульсацией скоростей и с линейной корреляцией между мгновенными скоростями, определяющими масштаб этой турбулентности. В конечном итоге, появляются такие гидроморфологические характеристики потока и такой морфометрический рельеф рабочей поверхности футеровки, при которых поток на преодоление всех сопротивлений затрачивает минимум энергии и минимум диссипации энергии. Рассматриваются основные составляющие новой ресурсо- и энергосберегающей технологии измельчения руд в шаровых мельницах. Рассматриваются новые конструкции резиновых футеровок типа «Волна» для всех типов шаровых мельниц и для всех стадий измельчения минерального сырья.

Ключевые слова: резиновая футеровка, шаровые мельницы, волновой износ, ресурсо- и энергосберегающая технология.

1 Введение

Эволюция технологий измельчения минерального сырья прошла сложный путь от каменной ступки с пестиком (5-7 тыс. лет до н.э.) и механической толчеи с приводом от водяного колеса (15-18 в. н.э.) до современных барабанных мельниц диаметром 14-18 м, мощностью привода более 36000 кВт и сложной системой автоматического управления; соответственно эволюция защитных футеровок – от каменного литья и металлических плит до композитных материалов. Первые описания защитных футеровок и первые патенты относятся к началу XX века и свидетельствуют о довольно грамотном инженерном подходе; по крайней мере конструкции металлических плит, профиль их рабочей поверхности и особенно способ крепления к барабану системой «винт – гайка» за последние примерно сто лет изменились несущественно.

Резиновая футеровка в практике горно-металлургических предприятий наибольшее распространение получила в шаровых мельницах мокрого измельчения и мельницах мокрого самоизмельчения. Работы последних лет в рассматриваемой области [1-5] с достаточной очевидностью свидетельствуют о важности исследований процессов измельчения материалов в барабанных рудоразмельных мельницах и роли защитных футеровок в этих процессах.

Применение резиновых футеровок, помимо чисто практического интереса, способствовало также более глубокому исследованию взаимодействия мельничной загрузки и футеровки и, в конечном итоге, подтвердило правильность волновой теории износа [6].

Согласно волновой теории износа для улучшения технологии измельчения и увеличения долговечности футеровки необходимо, чтобы в барабане мельницы установилось такое взаимодействие загрузки и элементов футеровки, при котором затрачивается минимум энергии и соблюдается принцип минимума производства энтропии, т.е. минимума беспорядка в системе. Такое гармоническое взаимодействие достигается благодаря использованию новых оригинальных конструкций футеровок типа «Волна». Помимо этого, такие футеровки благодаря своим морфометрическим

параметрам при разрушении руды позволяют реализовать преимущественно сдвиговые напряжения, что позволяет значительно снизить энергозатраты на дезинтеграцию минерального сырья, а также увеличить прирост готового класса (-0,056 мм). В процессе эксплуатации элементы футеровок приобретают волновую поверхность, которая сохраняется практически до отказа. Футеровки «Волна» обеспечивают: заданную производительность с первых часов работы мельницы; сохранение волнового рельефа до полного износа, что позволяет достигать стабильных технологических показателей в течении всего срока эксплуатации.

На данный момент более 230 видов мельниц, работающих с различными видами руд на предприятиях горнодобывающей промышленности, оснащены футеровкой типа «Волна» производства ООО «Валса-ГТВ». Футеровки типа «Волна» серийно выпускаются предприятием ООО «Валса-ГТВ».

Для 2-й и 3-й стадий измельчения наиболее востребованными являются конструкции «Плита-Волна» (футеровка выпускается в двух вариантах: «Плита-Волна» гладкая и «Плита-Волна» самофутерующаяся, а также футеровка типа «Плита-Лифтёр-Волна».

2. Результаты сравнительных испытаний шаровых мельниц с металлическими и резиновыми футеровками

Такие испытания проводились в лаборатории на модельной мельнице и в промышленных условиях. Для определения влияния частоты вращения барабана на выход расчётного класса крупности измельчаемого материала при различных типах футеровок и влияния напряжений в материале на эффективность его измельчения в лабораторной мельнице было проведено две серии испытаний. Контрольным параметром был класс крупности – 100 мкм.

В первой серии испытаний исследовалась зависимость выхода расчётного класса крупности от частоты вращения барабана (рис. 1); как видно для обеих футеровок наблюдались явно выраженные максимумы полученных зависимостей.

Характерно, что для металлической футеровки этот максимум находится при частотах вращения $Z = (68-72) \%$ от критической. Для резиновой футеровки максимум содержания класса 100 мкм и ниже находится в пределах $Z = (76-82) \%$ от критической.

Это явление можно объяснить тем, что металлическая футеровка

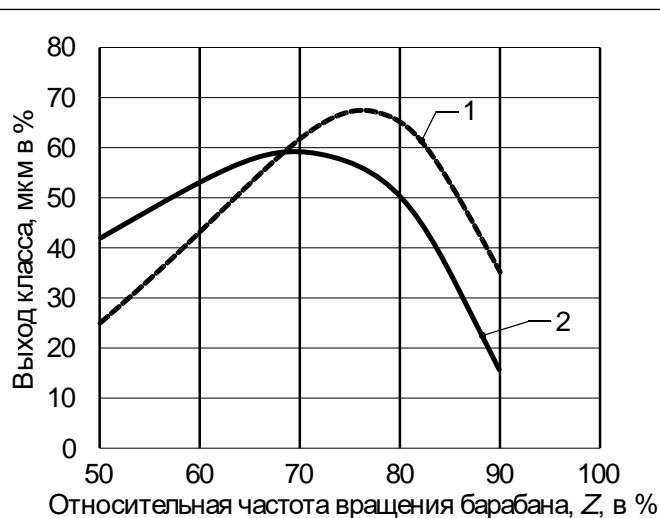
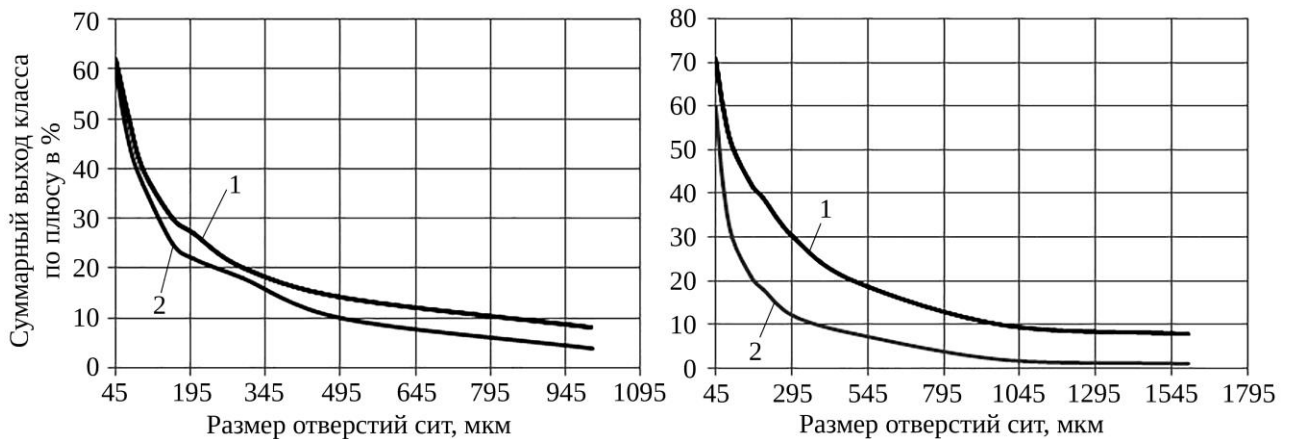


Рисунок 1 – Влияние частоты вращения барабана на выход расчётного класса крупности

способна поднимать шары на большую высоту и при меньших скоростях формировать двухфазный режим работы внешнего слоя шаровой загрузки. Причём отрыв шаров внешнего слоя шаровой загрузки от футеровки происходит выше точки теоретического отрыва, так как футеровка имеет на своей поверхности выступы, по размерам значительно превышающие размеры шаров. В таких случаях имеет место заброс шаров на противоположную сторону. Такое явление следует считать отрицательным.

Вторая серия экспериментов проводилась при частотах вращения барабана (рис. 2), соответствующих максимумам содержания расчётного класса, полученных при проведении первой серии опытов, то есть при $Z = 70\%$ и $Z = 80\%$.

Сравнение двух серий экспериментов позволяет сделать вывод, что повышение содержания расчётного класса в мельницах с резиновой футеровкой связано с отсутствием заброса шаров.



а – относительная частота вращения 70 % б – относительная частота вращения 80 %

1 – при использовании металлической футеровки;

2 – при использовании резиновой футеровки

Рисунок 2 – Суммарные характеристики продуктов измельчения

Наиболее эффективным следует считать профиль, не допускающий проскальзывания загрузки по футеровке не только на траекториях подъёма, но и в зоне пяты отката. Частично этому требованию отвечает резиновая футеровка. Однако есть участки, по которым происходит удар шаров под такими углами, что возможен отскок в произвольном направлении. Это приводит к тому, что шары не сразу увлекаются на круговые траектории, а скапливаются над пятой, способствуя явлению «интерференции». Кроме того, при ударе шаров о футеровку под небольшими углами имеет место относительное проскальзывание. В местах контакта шара и металлической плиты возникают нормальные напряжения, а шары отдают часть своей энергии на разрушение собственной поверхности и поверхности футеровки. Это подтверждает выкладки разработанной модели. Так, марганцовистые стали 110Г13Л при ударе под прямым углом хорошо наклёпываются, при этом увеличивается твёрдость их поверхностей. В случае применения резиновых футеровок такие эффекты не возникают.

На основании изложенного можно сделать вывод, что наиболее эффективным будет такая футеровка, в которой на поверхности отсутствуют участки, где возможен удар шаров под углами менее 90° .

Были проведены также сравнительные испытания воздействия резиновой футеровки на технологические показатели мельниц в условиях горно-обогатительного комбината ЧАО «СевГОК» (табл. 1).

На ЧАО «СевГОК» на мельницах МШР 3,6×4,0 и МШЦ 3,6×5,0 было проведено промышленные испытания резиновой футеровки с волновым профилем.

Таблица 1 – Результаты сравнительных испытаний

Технологические показатели	Стадия измельчения	Металлическая футеровка	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
Удельные расходы электроэнергии **, кВт/т руды	2	5,727	5,349	5,50
	3	6,370	5,890	5,92

Применение такой футеровки обеспечило выход на необходимый технологический режим и производительность уже через трое суток работы. Предварительные результаты промышленных испытаний показывают, что применение футеровки волнового профиля по сравнению с металлической футеровкой (самофутерующая футеровка, так называемая «Мехельсоновская футеровка») позволило повысить производительность мельницы по выходным питанием на 3-5 % при условии обеспечения необходимого качества измельчения.

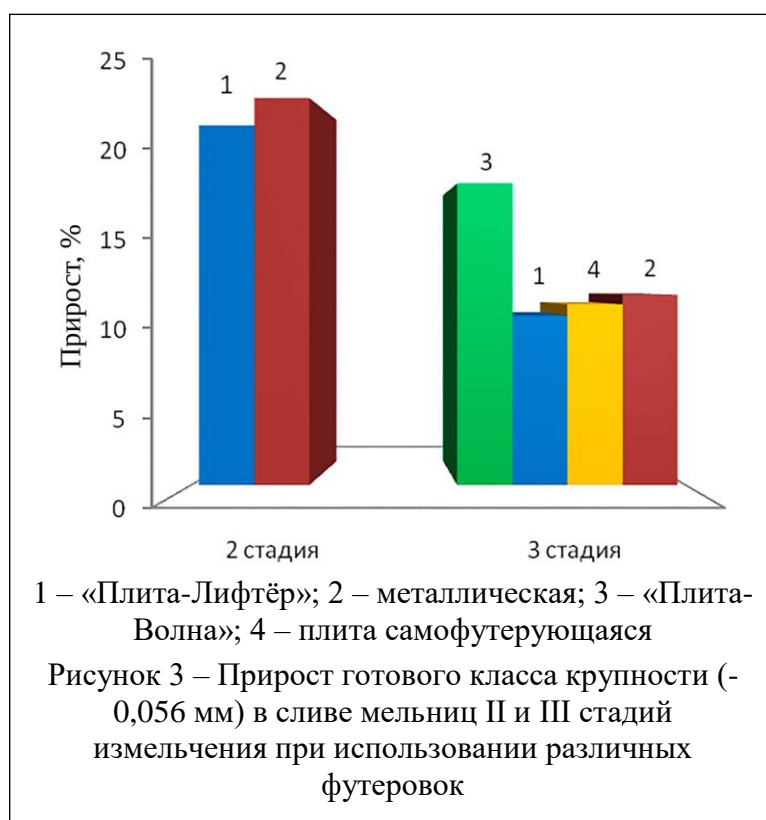
Как видим в табл. 1, удельный расход электроэнергии на мельницах с резиновой футеровкой за весь период испытаний по сравнению с металлической футеровкой ниже: во второй стадии измельчения на 7,1 %, в третьей стадии измельчения на 7,46 %. Кроме этого, применение резиновых футеровок в технологических схемах рудоподготовки позволило: снизить удельный расход шаров на 10 % и снизить удельный расход электроэнергии всего на технологическую секцию 10-12 %.

Анализ полученных результатов (рис. 3, табл. 2) показывает, что во второй стадии измельчения резиновая футеровка имеет аналогичные технологические показатели со стальной футеровкой шарошипового профиля. Прирост готового класса (-0,056 мм) в сливе мельницы составляет в обоих случаях 22,3 %; в третьей стадии измельчения резиновая футеровка типа «Плита-лифтёр» и металлическая футеровка шарошипового профиля имеют практически одинаковые технологические показатели по измельчению: прирост по готовому классу в сливе мельницы составляет 10,5-11,8 %; резиновая футеровка типа «Плита-Волна» имеет прирост готового класса в сливе мельницы 18,7 %, что в два раза выше, чем с металлической футеровкой шарошипового профиля и резиновой футеровкой типа «Плита-лифтёр».

При использовании резиновой футеровки в третьей стадии наблюдается увеличение выхода готового класса крупности (-0,044 мм) на 3,9 % и увеличение качества конечного концентрата по железу общему на 0,3 % (табл. 2).

Таблица 2 – Результаты исследований измельчения магнетитовых кварцитов с использованием металлической и резиновой футеровок мельниц

Продукт	Класс крупности, мм	Выход, %	Массовая доля Fe общ, %
Секция с мельницей МШЦ 3,6×5,5 с металлической футеровкой			
Слив г/ц 3 ст.	+0,071	1,0	18,5
	-0,071+0,056	3,1	24,5
	-0,056+0,044	3,5	43,7
	-0,044+0	92,4	66,5
	Всего	100	63,9
Магнитный	+0,071	0	–



продукт 4 ст.	-0,071+0,056	3,2	27,6
	-0,056+0,044	2,8	46,2
	-0,044+0	94,0	67,2
	Всего	100	65,5
Секция с мельницей МШЦ 3,6×5,5 с резиновой футеровкой			
Слив г/ц 3 ст.	+0,071	0	–
	+0,056	1,5	25,3
	-0,056+0,044	2,2	41,4
	-0,044+0	96,3	66,0
	Всего	100	64,85
Магнитный продукт 4 ст.	+0,071	0	–
	-0,071+0,056	2,1	20,1
	-0,056+0,044	1,8	32,5
	-0,044+0	96,2	67,4
	Всего	100	65,8

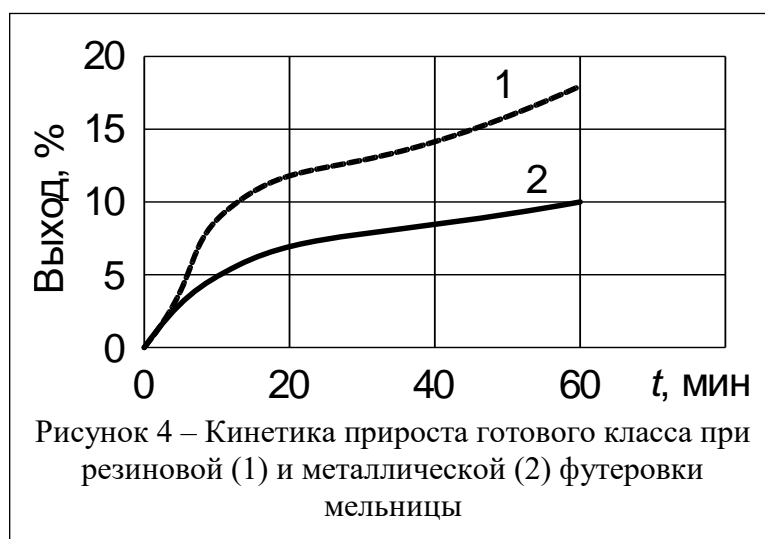
При оценке раскрытия минеральных зёрен установлено, что при использовании резиновой футеровки повышается раскрытия рудных зёрен на 1,8-3 %, нерудных – на 1,3 %, что в свою очередь увеличивает качество конечного концентрата на 0,3 %.

Для анализа влияния материала футеровки на процесс измельчения рассмотрены результаты измельчения железистых кварцитов в одной и той же мельнице но с разными видами футеровок: с металлической и с резиновой. На рис. 4 представлены экспериментальные данные кинетики прироста готового класса (-0,071 мм) в мельнице с металлической и резиновой футеровки.

Показано, что раскрытие рудных и нерудных минералов при измельчении магнетитовых кварцитов полифракционного состава в условиях неравномерно-компонентного сжатия куска руды контактными силами происходит при достижении напряжением, индуцирующим внутри зёрен сдвиговые напряжения, величины, равной пределу прочности на сдвиг и растяжение, которые ориентированы параллельно внешним нормальным (сжимающим) нагрузкам или перпендикулярно направлены сдвиговым (растягивающим) напряжениям.

3. Новая ресурсо- и энергосберегающая технология

Применение футеровок типа «Волна» позволило создать новую энергосберегающую ES-технология (ES-Technology – EnergySavingTechnology) измельчения руд шаровых мельницах [4, 5]. 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 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 (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.

Следующим шагом в развитии мельничных футеровок типа «Волна» предприятия ООО «Валса-ГТВ» стало создание футеровок для первой стадии измельчения с шарами диаметром 100 мм (в перспективе с диаметром 120 мм). Здесь предприятие придерживалось двух концепций.

Первая концепция предполагала использование резинометаллической футеровки: для повышения несущей способности в резиновые элементы были завулканизированы металлические вставки (шпы) из высокомарганцовистой стали (футеровка «G.M-Волна»). На СевГОКе на мельнице МШР 3,6×4,0 на первой стадии измельчения с шарами диаметром 100 мм впервые в мировой практике дезинтеграции крепких железных руд была установлена резинометаллическая футеровка типа «G.M-Волна». Результаты испытаний: снизилось потребление электроэнергии на 5 %; удельный расход мелющих тел снизился на 5 %; прирост готового класса продукта увеличился на 10-12 %; долговечность до отказа 9044 часа.

Вторая концепция предполагала использование сочетания оригинальной марки резины (изготовлена по нанотехнологии и обладает повышенной диссипацией энергии) и футеровочных плит высокого профиля типа «Плита Н-Волна». В 2013 году на ПАО «СевГОК» начаты сравнительные промышленные испытания такой футеровки и стандартной металлической футеровки производства ЗАО «КЗГО». Футеровки

устанавливались в шаровых мельницах с разгрузкой через решётку типа МШР 3,6×4,0 первой стадии измельчения. Рудообогатительная фабрика № 1 перерабатывает кварциты Первомайского и Анновского месторождения Криворожского бассейна. В цикле рудоподготовки первой стадии измельчения использовались стальные шары диаметром 100 мм третьей группы твёрдости.

Резиновая футеровка «Плита Н-Волна» (первые три кольца от загрузки с толщиной плит 270 мм, остальные – 240 мм) была установлена на мельнице № 121, металлическая – на мельнице № 111. Обе мельницы МШР 3,6×4,0 были установлены в цикле первой стадии рудоподготовки на одной технической секции № 11-12 и работали в замкнутом цикле со специальным классификатором типа 2КСН 12,5/2,4.

Технологическая секция № 11-12 оснащена системой АСУТП, позволяющей работать в режиме «Оптимизации» и режиме «Стабильность». После запуска мельницы № 121 с резиновой футеровкой в эксплуатацию выполнить корректировку системы АСУТП цикла первой стадии измельчения не удалось ввиду существенного уменьшения шумовых характеристик работы мельниц: датчик шума практически не реагировал на работу мельницы.

Поэтому вследствие изменения шумовых характеристик мельницы с резиновой футеровкой «Плита Н-Волна» цикл первой стадии измельчения секции № 11 работал в режиме «Стабилизация».

За весь период испытаний на РОФ-1 поступала дроблёная руда с содержанием класса +20 мм 12 % удельная работа разрушения рудной шихты составляла 8,8 кгм/см³; эпизодически поступала руда крупностью 50-200 мм (3-5) %.

В ходе проведения промышленных испытаний контролировались основные технологические показатели; результаты сравнительных испытаний представлены в табл. 3.

Анализ результатов работы мельницы с резиновой футеровкой «Волна» в сравнении с работой мельницы с металлической футеровкой показывает, что в цикле рудоподготовки первой стадии измельчения применение резиновой футеровки приводит к увеличению готового класса в сливе мельницы, увеличению удельной нагрузки мельницы по вновь образованному классу. За счёт изменения характера движения внутримельничной среды при работе мельницы с резиновой футеровкой «Плита Н-Волна» происходит лучшее раскрытие минералов и, как следствие, повышение содержания железа в концентрате первой стадии магнитной сепарации.

Таблица 3

	Мельница № 121 резиновая футеровка	Мельница № 111 металлическая футеровка
Среднечасовая нагрузка по исходной руде, т/час	107	108

Содержание готового класса -0,056 мм в сливе мельницы, %	39,9	37,1
Удельная нагрузка по вновь образованному классу -0,056 мм	1,486	1,451
Содержание Fe в концентрате 1 стадии ММС	51,4	50,8

Результаты испытаний:

- Мельница МШР-3,6×4,0, зафутированная резиновой футеровкой и резинометаллической решёткой производства ООО «Валса-ГТВ», выдержала промышленные испытания и выработала свой гарантийный срок эксплуатации: наработка составила 6850 часов.
- Волновой профиль резиновой футеровки положительно отразился на технологических показателях измельчения: произошло увеличение содержания готового класса в сливе мельницы на 2,8%, увеличение удельной нагрузки мельницы по вновь образованному классу и увеличение содержания железа в концентрате первой стадии магнитной сепарации на 0,6%.
- В качестве мелющих тел в первой стадии измельчения в условиях РОФ-1 ПАО «СевГОК» использовались шары стальные диаметром 100 мм 3 группы твёрдости производства ПАО «МК «АЗОВСТАЛЬ». За период работы удельный расход шаров по мельнице № 121 составил 0,586 кг/т руды, по мельнице № 111 – 0,645 кг/т руды, т.е. произошло снижение удельного расхода шаров на 10,0 %.
- Анализ показателей расхода электроэнергии по сравниваемому периоду показал, что по мельнице с резиновой футеровкой наблюдалось снижение удельного расхода электроэнергии на одну тонну переработанной руды на 5,0 % по сравнению с мельницей с металлической футеровкой.
- Отмечается высокая живучесть резиновой футеровки типа «Плита Н-Волна» и её устойчивость к изменению крупности технологической нагрузки. По техническим причинам на протяжении всего периода работы резиновой футеровки в питании мельницы присутствовали не свойственные для технологии первой стадии измельчения размеры частиц 50-200 мм (3-5) %. При этом производительность мельницы изменилась незначительно, тонина помола увеличилась от 30 % до 48 %, и в содержании готового класса -0,056 мм в сливе мельницы наблюдалась повышенная доля мелкой фракции, в том числе наночастиц (менее 30-40μ).

Правильность выбора направления измельчения крепких железных руд по ES-технологии с использованием резиновой футеровки «Плита Н-Волна» подтверждена технологическими испытаниями на ОАО «Полтавский ГОК» на мельницах МШР-4,0×5,0 первой стадии измельчения с шарами диаметром 100 мм.

Сравнительные испытания проводились с марта 2014 г. по июнь 2015 г. на двух мельницах МШР 4,0×5,0: мельнице № 72 с резиновой футеровкой «Плита Н-Волна» (первые два ряда толщиной 270 мм, остальные – 240 мм) и

мельнице № 52 с металлической футеровкой (сталь ЛМЦ); за весь период испытания на секции поступала дроблёная руда класса 6-8 мм.

Результаты испытаний:

- Мельница № 72 с резиновой футеровкой барабана типа «Плита Н-Волна» и резинометаллической решёткой выдержала промышленные испытания: при гарантийном сроке эксплуатации 8000 ч фактически отработала 8891 час. Испытания прекращены по причине износа решётки; в основном, минимальная остаточная толщина футеровочных плит барабана составляла 110 мм, в некоторых местах 45 мм.
- За сравниваемый период испытаний общая производительность секций по переработке руды мельниц № 72 и № 52 была примерно одинаковой; отклонение не превышало 0,34 %.
- Удельный расход мелющих тел на переработку тонны руды мельницы № 72 с резиновой футеровкой составил 0,528 кг/т, что связано в основном с поломкой резинометаллической решётки; мельницы № 52 с металлической футеровкой составил 0,531 кг/т (отклонение 0,6 % в рамках погрешности).
- Удельный расход электроэнергии на тонну вновь образованного готового класса крупности -0,071 мм мельницы № 72 с резиновой футеровкой составил 20,905 кВт·ч/т, мельницы № 52 с металлической футеровкой – 23,415 кВт·ч/т; снижение удельного расхода электроэнергии для мельницы с резиновой футеровкой составило 2,511 кВт·ч/т (10,72 %); снижение удельного расхода электроэнергии на тонну переработанной руды составило 7,67 %.

На резиновой футеровке типа «Плита Н-Волна» производства ООО «Валса-ГТВ» чётко наблюдается волновой характер абразивно-усталостного износа плит, что свидетельствует о правильности расчёта укладки плит в барабане. Такой волновой профиль рабочей поверхности футеровки появился через одну-две недели и сохранялся до 8 месяцев работы. Это гарантировало качественное измельчение руды и оптимальную долговечность плит в пределах 9 тыс. часов.

4. Индекс качества Valsa-E/F

На предприятии ООО «Валса-ГТВ» разработан индекс качества «Valsa-E/F», показывающий повышение качества работы мельницы с резиновой футеровкой по сравнению с аналогичной мельницей с металлической футеровкой. Здесь E – энергосбережение за счёт применения резиновой футеровки, выражается в % как снижение удельного расхода электроэнергии на тонну перерабатываемой руды или на тонну вновь образуемого готового класса крупности; F – снижение удельного расхода шаров в % на тонну перерабатываемой руды.

Для мельницы МШР 3,6×4,0 с резиновой футеровкой «Плита Н-Волна» (ПАО «СевГОК») индекс качества равен 5/10.

Для мельницы МШР 4,5×5,0 с резиновой футеровкой «Плита Н-Волна» (ОАО «Полтавский ГОК») индекс качества равен 7,67/0,67.

Индекс качества «Valsa-E/F» может быть выражен и в абсолютных величинах: в этом случае, например, для мельницы с резиновой футеровкой ОАО «Полтавский ГОК» он равен 20,9 кВт·ч/т/0,528 кг/т.

Следует подчеркнуть, что для измельчения крепких полиметаллических и железных руд в шаровых мельницах первой стадии с шарами диаметром 100 мм резиновая футеровка «Плита Н-Волна» на сегодняшний день имеет самый высокий индекс качества и лучшее соотношение «цена-качество».

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

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

3. На предприятии ООО «Валса-ГТВ» разработаны новые конструкции резиновых футеровок; семилетний опыт применения их на более чем 20 предприятиях различных стран (примерно 180 мельниц различного технологического назначения) показал явные преимущества резиновых футеровок по сравнению с металлическими.

4. Применение новых конструкций резиновых футеровок на всех стадиях измельчения позволяет получить дополнительный резерв по питанию мельниц для последующего увеличения объёмов измельчения в пределах 10-15 % в целом по ГОКу, что существенно снижает капитальные и эксплуатационные затраты.

5. Впервые в мировой практике на первой стадии измельчения крепких железных руд с шарами диаметром 100 мм применена резиновая футеровка высокого профиля («Плита Н-Волна»); результаты испытаний: долговечность до отказа 7-9 тыс. ч, экономия шаров до 10 %, электроэнергии – до 5-8 %.

6. Новые конструкции резиновых футеровок впервые позволили создать новую ресурсо- и энергосберегающую ES-технологию измельчения минерального сырья в шаровых мельницах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дырда, В.И. Резиновые футеровки технологических машин / В.И. Дырда, Р.П. Зозуля, О.Н. Хоменко, И.В. Хмель. – Днепр: Журфонд, 2016. – 260 с.
2. Развитие систем мельничных футеровок / Klas-Goran Eriksson, Gunder Marklund, А.П. Гребенешников, В.Ю. Фищев // Горная промышленность. – 2010. – № 1.
3. Исследование износа футеровочных плит шаровых мельниц на Талнахской обогатительной

фабрике / П.В. Маляров, Н.И. Сысоев, Е.В. Скляр // Обогащение руд. – 2013. – №3. – С. 6-9.

4. Дырда, В.И. Энергосберегающая ES-технология дезинтеграции руд в шаровых мельницах с резиновой футеровкой / В.И. Дырда, В.А. Калашников, И.В. Хмель // Черная металлургия. – 2014. – Вып. 2 (1370). – С. 22-26.

5. Дырда, В.И. Резиновая футеровка шаровых мельниц в новой ресурсо- и энергосберегающей технологии измельчения крепких руд / В.А. Калашников, Л.Г. Головкин, В.И. Дырда, А.В. Стойко, И.В. Хмель // Черная металлургия. – 2016. – Вып. 1 (1393). – С. 70-74.

REFERENCES

1. Dyrda, V.I., Zozulya, R.P., Khomenko, O.N. and Khmel, I.V. (2016), *Rezinovyie futerovki tekhnologicheskikh mashin* [Rubber linings of technological machines], Dnipro, Ukraine.

2. Eriksson, K.-G., Marklund, G., Grebeneshnikov, A.P., Fishchev, V.Yu. (2010), Mill linings systems development, *Mining industry*, no. 1.

3. Maliarov, P.V., Sysoev, N.I. and Skliarov, E.V. (2013), “Investigation of wear of lining plates of ball mills at Talnakh Concentration Plant”, *Obogashchenie rud*, no. 3, pp. 6-9.

4. Dyrda, V.I., Kalashnikov, V.A. and Khmel, I.V. (2014), “Energy-saving ES-technology for disintegration of ores in ball mills with rubber lining”, *Chernaia metallurgii*, no. 2 (1370), pp. 22-26.

5. Kalashnikov, V.A., Golovko L.G., Dyrda, V.I., Stoiko A.V. and Khmel, I.V. (2016), “Rubber lining of ball mills in new resource and energy-saving technology of crushing hard ores”, *Chernaia metallurgii*, no.1 (1393), pp. 70-74.

Обавторах

Калашников Вячеслав Алексеевич, інженер, директор ООО «Валса-ГТВ», Біла Церква, Україна, director@valsa-gtv.com

Головкин Любов Григорівна, інженер, головний інженер ООО «Валса-ГТВ», Біла Церква, Україна, chief.eng@valsa-gtv.com

Стойко Алексей Вячеславович, інженер, головний конструктор ООО «Валса-ГТВ», Біла Церква, Україна, kb@valsa-gtv.com

Дырда Віталій Ілларіонович, доктор технічних наук, професор, завідувачий відділом механіки еластомерних конструкцій горних машин, Інститут геотехнічної механіки ім. Н.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАНУ), Дніпро, Україна, vita.igtm@gmail.com

Хмель Ірина Віталіївна, кандидат технічних наук, головний обогатитель, ПАО «СевГОК», Кривий Ріг, Україна, hmel-iv@sevgok.com

About the authors

Kalashnikov Vyacheslav Alekseevich, Master of Science, Director Valsa-GTV Ltd., Bila Tserkva, Ukraine, director@valsa-gtv.com

Golovko Lubov Grigorievna, Master of Science, Chief Engineer in Valsa-GTV Ltd., Bila Tserkva, Ukraine, chief.eng@valsa-gtv.com

Stoiko Aleksei Viacheslavovich, Master of Science, Chief designer in Valsa-GTV Ltd., Bila Tserkva, Ukraine, kb@valsa-gtv.com

Dyrda Vitaly Illarionovich, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Professor, Head of Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnipro, Ukraine, vita.igtm@gmail.com

Khmel Irina Vitaliyevna, Candidate of technical sciences (Ph. D.), Chief Enricher, Northern Mining and Processing Plant, Kryvyi Rih, Ukraine, hmel-iv@sevgok.com

Анотація. З другої половини минулого століття в якості захисних футеровок стали застосовувати гуму, чому сприяли її унікальні властивості. Однією з провідних фірм в області створення і постачання гумових футеровок для всіх існуючих типів кульових млинів стало підприємство ТОВ «Валса-ГТВ» (м. Біла Церква, Україна). Цьому сприяло наступне: наявність високотехнологічного сучасного обладнання, розробка оптимальних конструкцій елементів футеровок, спеціальні марки гум і професійний супровід експлуатації млинів з футеровкою підприємства. Важливим при цьому було також використання фундаментальних досягнень в області динаміки млинів і механіки гуми. Створена теорія хвильового абразивно-втомного зносу гумових футеровок, методи їх розрахунку і методи укладання елементів в барабані дозволили

механікам і технологам створити футерування типу «Хвиля» (на ринку послуг «Плита-Хвиля», «Плита-Ліфтер-Хвиля», «ГМ-Хвиля» та «Плита-Н-Хвиля»). Викладається закономірність хвильового зносу гумової футеровки при її взаємодії з внутрішньомлиновим завантаженням. Показано, що рельєф футерування знаходиться в певній залежності від структури потоку і є відбитком структурних утворень його турбулентності; утворюються при цьому нові форми поверхні футеровки безпосередньо пов'язані з пульсацією швидкостей і з лінійною кореляцією між миттєвими швидкостями, що визначають масштаб цієї турбулентності. В кінцевому підсумку, з'являються такі гідроморфологічні характеристики потоку і такий морфометричний рельєф робочої поверхні футеровки, при яких потік на подолання всіх опорів витрачає мінімум енергії і мінімум дисипації енергії. Розглядаються основні складові нової ресурсо- та енергозберігаючої технології подрібнення руд в кульових млинах. Розглядаються нові конструкції гумових футеровок типу «Хвиля» для всіх типів кульових млинів і для всіх стадій подрібнення мінеральної сировини.

Ключові слова: Гумова футеровка, шарові млини, хвильовий знос, ресурсо- та енергозберігаюча технологія.

Abstract. Since the second half of the last century, rubber was used as protective lining, which was promoted by its unique properties. One of the leading companies in the field of creating and supplying of rubber liners for all existing types of ball mills was the company Valsa-GTV LLC (Bila Tserkva, Ukraine). This was facilitated by the following: availability of high-tech modern equipment, development of optimal designs for the lining elements, special rubber grades and professional support of operation of the mills with the company's liners. Important in this case was also the use of fundamental achievements in the field of the mill dynamics and rubber mechanics. The created theory of the wave abrasion-fatigue wear of the rubber lining, methods for the lining calculation and methods for the elements laying out in the drum allowed mechanical and manufacturing engineers to create the liners of the «Wave» type (brands in the market of services: «Plate-Wave», «Plate-Lifter-Wave», «G.M-Wave» and «Plate-H-Wave»). Regularity of wave wear of the rubber lining is described in terms of its interdependence with load inside the mill. It is shown that relief of the lining to some extent depends on the structure of the material stream and is an imprint of the structural formations of the stream turbulence; the forming new reliefs of the lining surface are associated directly with velocity fluctuations and linear correlation between the instantaneous velocities, which determine rate of the turbulence. In the end, such hydromorphological characteristics of the stream and such morphometric relief of the lining working surface appear, at which the stream applies minimum energy and minimum energy dissipation to overcome all of the obstacles. The main components of the new resource- and energy-saving technology of ore grinding in the ball mills are described. New designs of the rubber liners of the «Wave» type for all types of the ball mills and for all stages of raw mineral grinding are considered.

Keywords: Rubber lining, ball mills, wave wear, resource- and energy-saving technology

Статья поступила в редакцию 07.06.2017

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук, проф. В.П. Надутым