

зарегистрирован Министерством культуры и информации Республики Казахстан 04.04.2013 г.
Свидетельство о постановке на учет периодического печатного издания 13508-Ж.

Издается с января 2003 г.

Приказом №1082 от 10.07.2012 г. Комитета по контролю в сфере образования и науки МОН РК внесен в перечень научных изданий, рекомендуемых для публикации основных результатов научной деятельности.

В журнале публикуются материалы, отражающие состояние и перспективы развития геологии, горного дела и металлургии не только в нашей стране, но и за рубежом. Журнал освещает проблемы охраны труда и техники безопасности, экономики, подготовки кадров и других вопросов, связанных с горно-металлургическим комплексом. В журнале представлены статьи прикладного характера, результаты фундаментальных исследований, служащие основой для новых технических разработок.

При перепечатке материалов ссылка на Горный журнал Казахстана обязательна. Ответственность за достоверность сведений в публикуемых статьях и рекламных материалах несут авторы и рекламодатели. Мнение редакции не всегда может совпадать с мнением авторов.

Адрес редакции:
050026, г. Алматы,
ул. Карасай батыра, 146, оф. 401,
тел.: +7 (747) 440-46-35
+7 (747) 343-15-02
minmag.kz

Представители журнала:

Центрально-Казахстанский регион –
ВЛАДИМИР ФЕДОРОВИЧ ДЕМИН
vladfdemin@mail.ru

Российская Федерация, Москва –
ИРИНА ЯРОПОЛКОВНА ШВЕЦ
shvetsirina@yandex.ru

Российская Федерация, Сибирский регион –
ЮРИЙ НИКОЛАЕВИЧ ШАПОШНИК
shaposhnikyury@mail.ru

Периодичность 12 номеров в год

Тираж 1500 экземпляров

ISSN 2227-4766

Подписной индекс **75807** в каталогах:
АО «Казпочта»,
ТОО «Эврика-Пресс»,
ТОО «Агентство «Евразия пресс»

Подписано в печать **28.06.2021 г.**

Отпечатано:
«Print House Gerona»
ул. Сатпаева 30А/3, офис 124
тел: + 7 727 250-47-40,
+ 7 727 398-94-59,
факс: + 7 727 250-47-39

УЧРЕДИТЕЛЬ И СОБСТВЕННИК
ТОО «Научно-производственное
предприятие «ИНТЕРРИН»



INTERRIN

Главный редактор

М.Ж. БИТИМБАЕВ, mbitimbaev@mail.ru

Заместитель гл. редактора

Л.А. КРУПНИК, leonkr38@mail.ru

Заместитель гл. редактора

Х.А. ЮСУПОВ, yusupov_kh@mail.ru

Ответственный редактор

Ю.А. БОЧАРОВА, Yuliya.Bocharova@interrin.kz

Специалист по связям с общественностью

Т.С. ДОЛИНА, Tatyana.Dolina@interrin.kz

Помощник редактора

И.П. КОНОНОВА (ПАШИННИНА),
Irina.Pashinina@interrin.kz

Редакционная коллегия:

Fathi Habashi (Canada), Dr. techn. [Vienna], Dr.h.c. [St. Petersburg], Dr.h.c. [National Tech Univ, Lima], Dr.h.c. [San Marcos Univ, Lima]

Fidelis Tawiah Suorineni, PhD,
Professor of Mining Engineering

З.С. Абишева, д-р техн. наук, академик КазНАН

Ж.Д. Байгулин, д-р техн. наук, профессор

А.Б. Бегалинов, д-р техн. наук, профессор
А.А. Бекботаева, PhD

А.А. Бектыбаев, канд. техн. наук

В.А. Белин (Россия), д-р техн. наук, профессор

В.И. Бондаренко (Украина), д-р техн. наук, профессор

Н.С. Буктуков, д-р техн. наук, профессор

А.Е. Воробьев (Россия), д-р техн. наук, профессор

С.Ж. Галиев, д-р техн. наук, профессор

А.И. Едильбаев, д-р техн. наук

Е.К. Едыгенов, д-р техн. наук, профессор

В.Г. Загайнов, канд. техн. наук

А.А. Зейнуллин, д-р техн. наук, профессор

Д.Р. Каплунов (Россия), д-р техн. наук, профессор

А.А. Лисенков, д-р техн. наук, профессор

В.Л. Лось, д-р геол.-минерал. наук, профессор

В.А. Луганов, д-р техн. наук, профессор

С.К. Молдабаев, д-р техн. наук, профессор

В.С. Музгина, д-р техн. наук

В.И. Нифадьев (Кыргызстан), д-р техн. наук, профессор

М.Б. Нурпеисова, д-р техн. наук, профессор

Е.Н. Ольшанский, член-корреспондент МАИН

Е.А. Петров (Россия), д-р техн. наук, профессор

И.Н. Столповских, д-р техн. наук, профессор

П.Г. Тамбиев, канд. техн. наук

Р.Р. Ходжаев, д-р техн. наук

Т.А. Чепуштанова, PhD

® – статья на правах рекламы

ⓘ – информационное сообщение

✍ – статья публикуется в авторской редакции

3 Колонка главного редактора

4 *Ломако Л.С.*

4 Создание цифрового рудника с помощью ГГИС МАЙНФРЭЙМ ®

6 Все новое – это хорошо дополненное старое ®

Геология

8 *Дьячков Б.А., Зимановская Н.А., Айтбаева С.С., Агеева О.В.*

8 Особенности геологического строения и критерии прогнозирования литиеносных пегматитов Восточного Казахстана

Гидрогеология

15 *Ченсизбаев Д.Б., Кан С.М.*

15 Факторы и условия формирования и освоения промышленных подземных вод Южного Казахстана

Открытые горные работы

20 *Sarybayev N.O., Moldabayev S.K., Sadat Hosay*

20 Cyclic and continuous method in coal mining

Разрушение горных пород

27 *Ескенова Г.Б., Абдиева А.Т.*

27 Тау жыныстарын жарылыспен бұзу кезінде жаншылу және жарықшақтардың пайда болу аймақтарының өлшемдерін зерттеу

Обогащение полезных ископаемых

32 *Телков Ш.А., Дуйсекешова А.С., Мотовилов И.Ю.*

32 Разработка технологии обогащения промпродукта магнетитовых руд

Качество продукции

41 *Калашиников В.А., Головки Л.Г., Дырда В.И., Агальцов Г.Н.*

41 Синергетика взаимодействия внутримельничной загрузки с резиновой футеровкой в барабанных мельницах

Экономика горных предприятий

49 *Камаров Р.Қ., Мальченко Т.Д., Демин В.Ф., Камарова Д.Н.*

49 Ашық кеніштердің жоспарланған өнімділігіне байланысты онтайландыру мәселерін шешуге арналған критерийлерді негіздеу

54 Требования к оформлению статей

56 *Рецензия на монографию Ракишева Б.Р., Битимбаева М.Ж., Минигулова А.М.*

56 «Циклично-поточная технология на подземных рудниках ТОО «Корпорация Казахмыс»»

Код МРНТИ 52.45.15

В.А. Калашников¹, Л.Г. Головки¹, В.И. Дырда², Г.Н. Агальцов²¹Общество с ограниченной ответственностью «НПП Валса-ГТВ» (г. Белая Церковь, Украина),²Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (г. Днепр, Украина)

СИНЕРГЕТИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВНУТРИМЕЛЬНИЧНОЙ ЗАГРУЗКИ С РЕЗИНОВОЙ ФУТЕРОВКОЙ В БАРАБАННЫХ МЕЛЬНИЦАХ

Аннотация. Рассматриваются основные положения волновой теории износа, необходимые для интерпретации результатов экспериментальных исследований и приводятся формулы, устанавливающие взаимосвязь между длиной волны естественного износа футеровки и динамическим радиусом движения загрузки. Излагается взаимосвязь между динамическими процессами, происходящими в барабане мельницы и некоторыми важными параметрами дезинтеграции руд, в частности: производительностью мельницы, скоростью износа футеровки, качеством конечного продукта, экономией шаров и электроэнергии. С этой целью проводились продолжительные экспериментальные исследования двух шаровых мельниц на первой стадии измельчения железной руды с шарами диаметром 100 мм. Периодически на всем протяжении работы резиновых футеровок типа «Плита-Н-Волна» фиксировались основные параметры мельниц. Приводятся экспериментальные доказательства взаимосвязи «рабочей волны» износа футеровки с длиной волны естественного износа, характерной для идеализированной мельницы.

Ключевые слова: волновая теория износа, барабанная мельница, дезинтеграция минерального сырья, резиновая футеровка, измельчение, износ, разрушение, ресурс, структурно-синергетическая модель, шаровая мельница.

Барабанды диірмендеріндегі резеңке төсеммен внутриметрлік жемнің өзара әрекеттесу синергиясы

Андатпа. Эксперименттік зерттеулердің нәтижелерін түсіндіру үшін қажет тозудың толқындық теориясының негізгі ережелері қарастырылып, астардың табиғи тозуының толқын ұзындығы мен динамикалық қозғалыс радиусы арасындағы байланысты орнататын формулалар келтірілген жүктеме. Диірмен барабанында болатын динамикалық процестер мен кендердің ыдырауының кейбір маңызды параметрлері арасындағы байланыс, атап айтқанда: диірмен өнімділігі, төсемнің тозу жылдамдығы, соңғы өнімнің сапасы және үнемдеу шарлар мен электр энергиясы сипатталған. Осы мақсатта темір рудасын диаметрі 100 мм шариктермен ұнтақтаудың бірінші кезеңінде екі шарлы диірменде ұзақ мерзімді эксперименттік зерттеулер жүргізілді; мезгіл-мезгіл, «Плита-Н-Толқын» типіндегі резеңке төсемдердің бүкіл жұмыс барысында диірмендердің негізгі параметрлері жазылды. Қабаттық тозудың «жұмыс толқыны» мен идеалданған диірменге тән табиғи тозудың толқын ұзындығының өзара байланысының тәжірибелік дәлелдері келтірілген.

Түйінді сөздер: тозудың толқындық теориясы, барабан диірмені, минералды шикізаттың ыдырауы, резеңке қаптау, ұнтақтау, тозу, жою, ресурс, құрылымдық-синергетикалық модель, шар диірмені.

Synergy of interaction of intramill feed with rubber lining in drum mills

Abstract. The main provisions of the wave theory of wear are considered, which are necessary for interpreting the results of experimental studies, and formulas are given that establish the relationship between the wavelength of natural wear of the lining and the dynamic radius of movement of the load. The relationship between the dynamic processes occurring in the drum of the mill and some important parameters of the disintegration of ores, in particular: the productivity of the mill, the rate of wear of the lining, the quality of the final product, and the saving of balls and electricity, is described. For this purpose, long-term experimental studies were carried out on two ball mills at the first stage of grinding iron ore with balls of 100 mm in diameter; periodically, throughout the entire operation of the rubber linings of the «Slab-H-Wave» type, the main parameters of the mills were recorded. Experimental evidence of the relationship between the «working wave» of lining wear and the wavelength of natural wear characteristic of an idealized mill is presented.

Key words: wave theory of wear, drum mill, disintegration of mineral raw materials, rubber lining, grinding, wear, destruction, resource, structural-synergetic model, ball mill.

Введение

Настоящая работа является продолжением теоретических и экспериментальных исследований резиновых футеровок тяжелых рудоизмельчительных мельниц с целью создания прогрессивной ресурсосберегающей технологии дезинтеграции минерального сырья. Этот вопрос рассматривался в работах Э. Дэвиса, Д.К. Крюкова, П.В. Малярова, С.Ф. Шинкаренко, К. Эриксона и ряда других авторов¹ [1-9]. Вместе с тем, ни в работах цитируемых авторов, ни в зарубежной литературе синергетика взаимодействия в системе «загрузка – футеровка» не рассматривалась в контексте волновой теории абразивно-усталостного износа футеровки. В настоящей работе эта проблема рассматривается именно в этом контексте, т. е. во взаимосвязи волны износа футеровки с производительностью мельницы, скоростью износа футеровки, качеством конечного продукта и т. д.

Волновая теория износа впервые была опубликована в 2012 г.; наиболее полно она изложена в работах [4, 9]. Результаты многочисленных промышленных исследований¹

полностью подтверждают основные положения волновой теории, в рамках которой стало возможным объяснение многих эффектов синергетического взаимодействия загрузки и футеровки; ее основные принципы положены в основу создания синергетических моделей разрушения резиновой футеровки [4] и создания алгоритма расчета ее долговечности [3]. Тем не менее, некоторые вопросы не получили должного освещения, в частности, проблема взаимодействия длины волны абразивно-усталостного износа резиновой футеровки с параметрами мельницы. С этой целью были проведены специальные промышленные исследования, в которых от начала работы мельниц до отказа резиновой футеровки периодически фиксировались следующие параметры: производительность мельницы Q , т/ч; износ футеровки, мм; скорость износа футеровки V , мм/тыс. т; длина волны износа футеровки l_{ϕ} , мм; качество конечного продукта; экономия шаров и электроэнергии.

Прежде чем перейти к изложению основного материала, рассмотрим в виде кратких тезисов основные

¹Дырда В.И., Зозуля Р.П., Головки Л.Г., Стойко А.В., Хмель И.В. Резиновые футеровки рудоизмельчительных мельниц в экстремальных условиях. – Днепр, 2018. – 276 с.

положения волновой теории износа, необходимые для интерпретации результатов экспериментальных исследований.

▪ В барабанных мельницах с резиновой футеровкой при исследовании динамики измельчения минерального сырья следует рассматривать лишь одно турбулентное движение потока, в котором имеются пульсации скоростей и давлений, подчиняющиеся вероятностным законам. Между турбулентностью как структурной формой потока и морфометрическими особенностями резиновой футеровки существует определенная связь: образование волн абразивно-усталостного износа элементов футеровки непосредственно связано с пульсациями скоростей, которые и определяют масштаб турбулентности. Именно благодаря турбулентности потока поверхность плоской футеровки со временем превращается в волнообразную.

▪ Движение технологической загрузки в мельнице следует рассматривать как движение сложных иерархических структур (турбулентное движение потока и пульсирующее вихреобразное движение загрузки). Возникновение новых структур и их гибель связаны с рядом факторов: турбулентностью потока, послышной диссипацией энергии потока, скольжением загрузки относительно футеровки, поворотной симметрией движения барабана мельницы, большой диссипацией энергии загрузки и т. д. Наиболее устойчивыми будут те структуры, которые подчиняются принципу Пригожина,

т. е. принципу минимума диссипации энергии или минимума производства энтропии.

▪ Морфометрические особенности резиновой футеровки зависят от структуры потока и его турбулентности, а образующиеся при этом новые формы рабочей поверхности футеровки непосредственно связаны с пульсацией скоростей. В реальных условиях работы мельниц наблюдается взаимная приспособляемость потока и футеровки; если такая приспособляемость отсутствует, т. е. существует период «нестабильного взаимодействия», то наблюдается снижение производительности мельницы, которая выходит на оптимальный режим работы лишь после установления равновесия между потоком и футеровкой. Именно при таком равновесии образуется рациональный рельеф рабочей поверхности футеровки и оптимальные гидроморфологические параметры потока, при которых наблюдается минимальное рассеяние энергии (принцип Рэля-Гельмгольца).

▪ Длительная практика эксплуатации барабанных мельниц показала, что именно волновой характер износа резиновой футеровки лежит в основе ее долговечности, а также в основе производительности мельницы, качестве конечного продукта, экономии шаров и электроэнергии.

▪ Известно¹, что в основе синергетической модели движения технологической загрузки в барабане мельницы лежат универсальные отношения, которые обычно связывают с принципом золотой пропорции. На основе этого принципа между динамическим радиусом движения загрузки R_g и длиной волны естественного износа футеровки l_ϕ установлена зависимость:

$$l_\phi = kR_g \operatorname{tg}(1/3\alpha) = 0,212kR_g;$$

$$k = d_m \exp(-f_0 \zeta),$$

где k – коэффициент корреляции (характеризует отклонение механического поведения реальной мельницы от идеальной модели, определяется опытным путем);

d_m – внутренний диаметр барабана мельницы;
 f_0 – коэффициент взаимодействия с футеровкой;
 ζ – некоторая постоянная;
 α – угол малой пульсации загрузки ($\alpha = 12^\circ$).

С помощью этой формулы можно произвести расчет шага укладки элементов футеровки. Формула обладает универсальностью и в равной степени пригодна для всех типов мельниц и для всех конструкций футеровок.

Цель работы: установить взаимосвязь длины волны износа резиновой футеровки с основными параметрами мельницы: производительностью, скоростью износа футеровки, ее долговечностью, качеством конечного продукта, экономией шаров и электроэнергии.

Экспериментальные исследования шаровых мельниц с резиновой футеровкой

Такие исследования проводились в промышленных условиях независимо друг от друга на двух предприятиях: на Северном горно-обогатительном комбинате («СевГОК», г. Кривой Рог, Украина) и на Полтавском горно-обогатительном комбинате («Полтавский ГОК», Украина). Целью испытаний было определение влияния волны естественного износа футеровки на производительность мельницы,

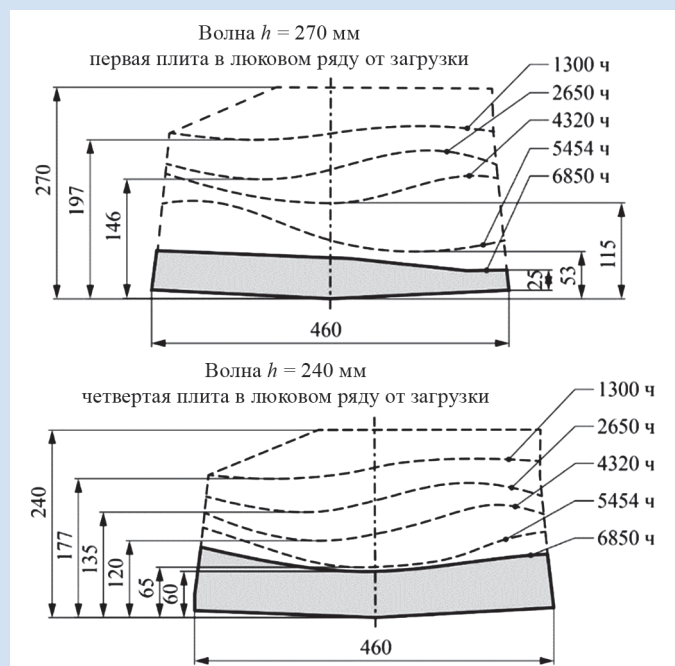


Рис. 1. Изменение «рабочей волны» износа резиновой футеровки в процессе эксплуатации мельницы (СевГОК, Кривой Рог).

Сурет 1. Диірмен жұмыс істеген кезде резинке төсемдердің тозуының «жұмыс толқынының» өзгеруі (СевГОК, Кривой Рог).

Figure 1. Change in the «working wave» of rubber lining wear during the operation of the mill (SевGOK, Kryvyi Rih).

качество готового продукта, долговечность футеровки и экономию шаров и электроэнергии.

Пример 1

На СевГОК резиновая футеровка производства ООО «НПП Валса-ГТВ» высокого профиля «Плита-Н-Волна» [6] (первые три кольца от загрузки толщиной плит 270 мм, остальные – 240 мм; часть плит имели в резиновом массиве завулканизированные металлические вставки) устанавливалась на мельнице №121 с разгрузкой через решетку типа МШР 3,6×4,0



Рис. 2. Изменение производительности мельницы и скорости износа резиновой футеровки в процессе эксплуатации мельницы (СевГОК, Кривой Рог).

Сурет 2. Диірмен өнімділігі мен диірмен жұмысындағы резеңке төсемнің тозу жылдамдығының өзгеруі (СевГОК, Кривой Рог).

Figure 2. Change in mill productivity and rubber lining wear rate during mill operation (SevGOK, Kryvyi Rih).

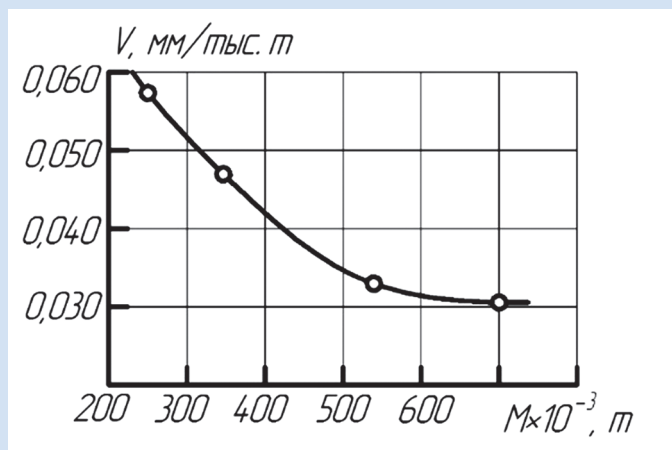


Рис. 3. Взаимосвязь скорости износа резиновой футеровки и количества переработанной руды (СевГОК, Кривой Рог).

Сурет 3. Резеңке қаптаманың тозу жылдамдығы мен өңделген кен мөлшері арасындағы байланыс (СевГОК, Кривой Рог).

Figure 3. Relationship between the rate of wear of the rubber lining and the amount of ore processed (SevGOK, Kryvyi Rih).

первой стадии рудоподготовки с шарами диаметром 100 мм. За весь период испытаний по технологичным причинам поступала дробленая руда с содержанием класса +20 (до 12%) и эпизодически – руда крупностью 50-250 мм (от 5% до 18%).

Результаты испытаний:

- мельница МШР 3,6×4,0 №121 с резиновой футеровкой успешно прошла промышленные испытания и выработала гарантийный срок 6850 ч [6]; за период работы по сравнению с аналогичной мельницей с металлической футеровкой наблюдалось снижение удельного расхода электроэнергии на тонну перерабатываемой руды на 5%; удельный расход шаров составил 0,586 кг/т руды [6];

- волновой характер износа плит футеровки появился примерно через 500-600 ч; первое вскрытие мельницы состоялось через 1300 ч (рис. 1); следует отметить, что волновой характер износа наблюдался на всех плитах и имел вид «речного узора», однако четкая длина «рабочей волны» появилась после 3,5-4,0 тыс. ч (точка А на рис. 2) и только после этого производительность мельницы начала заметно возрастать вплоть до отказа резиновой футеровки;

- волновой профиль футеровки положительно отразился на технологических показателях процесса измельчения руды: тонина помола увеличилась от 30% до 48%; в содержании готового класса (– 0,056 мм) в сливе мельницы наблюдалась повышенная доля мелкой фракции, в том числе части менее 30 м; произошел рост содержания готового класса в сливе мельницы на 2,8%; увеличение нагрузки мельницы по вновь образованному классу и содержания железа в концентрате – на 0,6%;

- волновой профиль футеровки позволил существенно уменьшить скорость ее износа; для плиты высотой 240 мм, например, износ уменьшился с 0,050 мм/тыс. т до 0,025 мм/тыс. т, т. е. в два раза (рис. 2); аналогичная зависимость получена также для кривой, показывающей взаимосвязь скорости износа футеровки от количества переработанной руды (рис. 3).

Пример 2

На Полтавском ГОК резиновая футеровка высокого профиля (первые два ряда от загрузки толщиной 270 мм, остальные – 240 мм) устанавливалась на мельнице МШР 4,0×5,0 №72 с шарами диаметром 100 мм; за весь период испытаний на секцию поступала дробленая руда класса 6-8 мм.

Результаты испытаний:

- мельница №72 с резиновой футеровкой типа «Плита-Н-Волна» и резинометаллической решеткой производства ООО «НПП Валса-ГТВ» до отказа отработала 8891 ч с заданной производительностью;

- волновой профиль рабочей поверхности футеровки очевидно появился примерно через 150-200 ч и сохранился вплоть до ее отказа;

- за период работы по сравнению с аналогичной мельницей с металлической футеровкой снизился расход шаров, а также на 10,72% снизился удельный расход электроэнергии;

зависимость износа от времени носила слабонелинейный характер (рис. 4); средняя скорость износа для плит толщиной 270 мм составила 0,0178 мм/тыс. т, 240 мм – 0,0144 мм/тыс. т.

Обсуждение результатов исследований

Дезинтеграция железной руды в рассматриваемых мельницах несколько отличалась. На Полтавском ГОК с шарами диаметром 100 мм резиновая футеровка ранее не использовалась, тем не менее переработка руды класса 6-8 мм оказалась вполне приемлемой для резиновой футеровки высокого профиля.

Условия работы мельницы все же можно считать довольно тяжелыми, поэтому длина волны износа футеровки не была стабильной, она изменялась в пределах 410-450 мм (при расчетной длине волны для идеализированной мельницы ($l_{\phi} = 460$ мм)). Это связано с разностью пульсаций скоростей потока вследствие наличия плит разной толщины. В начальный период эксплуатации мельницы наблюдалось незначительное уменьшение производительности и повышенный нелинейный износ футеровки; после краткого периода «нестабильного взаимодействия» футеровки и загрузки мельница вышла на заданный режим, а скорость износа существенно уменьшилась.

Условия дезинтеграции руды на мельнице МШР 3,6×4,0 (СевГОК) можно считать экстремальными; гибридная резиновая футеровка (плиты разной толщины, часть плит с завулканизированными металлическими вставками), несвойственная мельнице технологическая загрузка – все это вызвало некоторые особенности



Рис. 4. Зависимость износа резиновой футеровки от времени эксплуатации мельницы.

Сурет 4. Резекке төсемінің тозуының діірменнің жұмыс уақытына тәуелділігі.

Figure 4. Dependence of the wear of the rubber lining on the operating time of the mill.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Klas-Goran Eriksson, Gunder Marklund, Гребенешников А.П., Фицев В.Ю. Развитие систем мельничных футеровок. // Горная промышленность. – 2010. – №1. (на русском языке) <https://mining-media.ru/ru/article/drobilka/1623-razvitie-sistem-melnichnykh-futerovok>*

в механизме износа футеровки. Пик «рабочей волны» износа не оставался постоянным, он дрейфовал на различных плитах с различной скоростью (рис. 2), к тому же, длина волны износа до точки А (рис. 2) также изменялась от 375 мм до 445 мм.

Дрейф пика волны свидетельствовал о том, что на этом этапе эксплуатации мельницы в ее барабане происходит сложное хаотическое движение загрузки. Вследствие пульсации скоростей гидродинамическая гармония взаимодействия загрузки и футеровки была нарушена. Вместе с тем, несмотря на такое «нестабильное взаимодействие» загрузки и футеровки волновой характер износа появился уже с первых недель работы мельницы и носил вероятностный характер. Отсюда снижение производительности мельницы и нелинейность процесса износа. И только после того, как установилось равновесие (на рис. 2 после точки А), и длина «рабочей волны» износа приблизилась по величине к длине естественной волны износа, мельница вышла на заданный режим работы. При этом износ, несмотря на старение резины, для футеровочных плит 240 мм, например, уменьшился с 0,050 мм/тыс. т до 0,025 мм/тыс. т.

Как отмечалось выше, турбулентное движение загрузки способствовало появлению наночастиц и мелкой фракции. Это подтверждает высказанное ранее мнение¹ о том, что именно с турбулентностью связан процесс измельчения руды; с долговечностью резиновой футеровки связано гармоническое взаимодействие ее с рельефом плит. Здесь – вполне объяснимое и часто встречаемое на практике противоречие между требованиями долговечной футеровки и требованиями технологов к качеству конечного продукта.

Как видно, в рассматриваемых примерах явно прослеживается зависимость от длины волны износа плит футеровки таких основных параметров мельницы, как производительность, скорость износа футеровки и ее долговечность, качество конечного продукта, экономия шаров и электроэнергии.

Выводы

1. На базе широкого круга промышленных исследований установлена взаимосвязь волны абразивно-усталостного износа резиновой футеровки с основными параметрами мельницы: производительностью, скоростью износа футеровки, ее долговечностью, качеством конечного продукта, экономией шаров и электроэнергии.

2. Чем ближе длина «рабочей волны» износа футеровки к длине волны естественного износа l_{ϕ} , характерной для идеализированной мельницы, тем более рационально происходит процесс дезинтеграции руд: производительность мельницы возрастает, уменьшается скорость износа футеровки и увеличивается ее долговечность, улучшается качество конечного продукта, наблюдается экономия шаров и электроэнергии.

2. Крюков Д.К., Беляев Ю.В., Трубицын М.Н. Определение рационального профиля футеровочных плит с целью повышения технико-экономических показателей барабанных мельниц. // Дробильно-размольное оборудование и технология дезинтеграции: Междувед. сб. науч. тр. «МЕХАНОБР». – Л., 1989. – С. 70-77. (на русском языке)
 3. Bulat A.F., Dyrda V.I., Karnaukhov V.G. Долговечность термовизоэластических тел при длительном циклическом нагружении. // Международная прикладная механика. – 2019. – Т. 55. – С. 495-503. (на английском языке) <https://doi.org/10.1007/s10778-019-00971-1>
 4. Bulat A.F., Dyrda V.I., Kalhankov Ye.V. Синергетическая модель волнового абразивно-усталостного износа резиновой футеровки в шаровых мельницах. // Научный вестник НГУ. – Днепр, 2018. – №5(167). – С. 39-47. (на английском языке) <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/5>.
 5. Калашников В.А., Головкин Л.Г., Стойко А.В., Дырда В.И., Хмель И.В. Дезинтеграция железной руды в шаровых мельницах с резиновой футеровкой. // Геотехническая механика. – 2017. – Вып. 133. – С. 90-102. (на русском языке)
 6. Калашников В.А., Головкин Л.Г., Дырда В.И., Агальцов Г.Н. Некоторые проблемы создания энергосберегающих резиновых футеровок шаровых рудоизмельчительных мельниц. // Горный журнал Казахстана. – Алматы, 2019. – №8. – С. 46-49. (на русском языке)
 7. Дырда В.И. Теория волнового абразивно-усталостного износа упругонаследственных сред. // Геотехническая механика. – 2013. – Вып. 113. – С. 133-144. (на русском языке)
 8. Калашников В.А., Головкин Л.Г., Дырда В.И., Стойко А.В., Хмель И.В. Резиновая футеровка шаровых мельниц в новой ресурсо- и энергосберегающей технологии измельчения крепких руд. // Черная металлургия. – 2016. – Вып. 1(1393). – С. 70-74. (на русском языке)
 9. Дырда В.И., Калашников В.А., Стойко А.В., Хмель И.В. Динамическая модель волнового абразивно-усталостного разрушения резиновой футеровки в барабанных мельницах. // Геотехническая механика. – 2012. – Вып. 106. – С. 15-24. (на русском языке)
- ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ
1. Klas-Goran Eriksson, Gunder Marklund, Гребенешников А.Р., Фицев В.Ю. Диірмен төсеу жүйелерін дамыту. // Тау-кен өндірісі. – 2010. – №1. (орыс тілінде) URL: <https://mining-media.ru/ru/article/drobilka/1623-razvitie-sistem-melnichnykh-futerovok> (өтінім берілген күн: 29.06.2021)
 2. Крюков Д.К., Беляев Ю.В., Трубицын М.Н. Барабан диірмендерінің техникалық-экономикалық көрсеткіштерін жақсарту мақсатында төсем плиталарының ұтымды профилін анықтау. // Ұсату және ұнтақтау жабдықтары және ыдырау технологиясы: Ғылыми еңбектердің ведомствааралық жинағы «МЕХАНОБР». – Л., 1989. – Б. 70-77. (орыс тілінде)
 3. Bulat A.F., Dyrda V.I., Karnaukhov V.G. Термовизоэластикалық денелердің ұзақ мерзімді циклдік жүктемесіндегі беріктігі. // Қолданбалы механика. – 2019. – Т. 55. – Б. 495-503. (ағылшын тілінде) <https://doi.org/10.1007/s10778-019-00971-1>
 4. Bulat A.F., Dyrda V.I., Kalhankov Ye.V. Барабанды шарлы диірмендердегі резеңке төсемдердің толқын-абразивті-қажу тозуының синергетикалық моделі. // Ұлттық тау-кен университетінің хабаршысы. – Днепр, 2018. – №5(167). – Б. 39-47. (ағылшын тілінде) <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/5>.
 5. Калашников В.А., Головкин Л.Г., Стойко А.В., Дырда В.И., Хмель И.В. Резеңке қаптамалы шарлы диірмендерде темір рудасының ыдырауы. // Геотехникалық механика. – 2017. – №133. – Б. 90-102. (орыс тілінде)
 6. Калашников В.А., Головкин Л.Г., Дырда В.И., Агальцов Г.Н. Шарлы ұнтақтайтын диірмендердің энергия үнемдейтін резеңке төсемдерін құрудың кейбір мәселелері. // Қазақстанның тау-кен журналы. – Алматы, 2019. – №8. – Б. 46-49. (орыс тілінде)
 7. Дырда В.И. Серпімді тұқым қуалайтын орталардың толқынды абразивтік-шаршау тозу теориясы. // Геотехникалық механика. – 2013. – №113. – Б. 133-144. (орыс тілінде)
 8. Калашников В.А., Головкин Л.Г., Дырда В.И., Стойко А.В., Хмель И.В. Күшті кендерді ұсақтауға арналған жаңа ресурстық және энергия үнемдеу технологиясындағы шарлы диірмендердің резеңке төсемдері. // Қара металлургия. – 2016. – №1(1393). – Б. 70-74. (орыс тілінде)
 9. Дырда В.И., Калашников В.А., Стойко А.В., Хмель И.В. Барабан диірмендеріндегі резеңке төсемдердің толқын-абразивті-қажу бұзылуының динамикалық моделі. // Геотехникалық механика. – 2012. – №106. – Б. 15-24. (орыс тілінде)

REFERENCES

1. *Klas-Goran Eriksson, Gunder Marklund, Grebeneshnikov A.P., Fishchev V.Yu. Razvitie sistem mel'nichnykh futerovok [Development of mill lining systems]. // Gornaya promyshlennost' = Mining industry. – 2010. – №1. (in Russian). URL: <https://mining-media.ru/ru/article/drobilka/1623-razvitie-sistem-melnichnykh-futerovok> (date of access: 29.06.2021)*
2. *Kryukov D.K., Belyaev Yu.V., Trubitsyn M.N. Opredelenie racional'nogo profilya futerovochnykh plit s cel'yu povysheniya texniko-e'konomicheskikh pokazatelej barabannykh mel'nic [Determination of the rational profile of lining plates in order to improve the technical and economic indicators of drum mills]. // Drobil'no-razmol'noe oborudovanie i texnologiya dezintegracii: Mezhdovedomstvennyj sbornik nauchnykh trudov «MEKHANOB» = Crushing and grinding equipment and disintegration technology: Interdepartmental collection of scientific papers «MEKHANOB». – L., 1989. – P. 70-77. (in Russian)*
3. *Bulat A.F., Dyrda V.I., Karnaukhov V.G. Durability of Thermoviscoelastic Bodies Under Long-Term Cyclic Loading // International Applied Mechanics. – 2019. – Vol. 55. – P. 495-503. (in English) <https://doi.org/10.1007/s10778-019-00971-1>.*
4. *Bulat A.F., Dyrda V.I., Kalhankov Ye.V. Synergetic model of the wave abrasive-fatigue wear of rubber lining in the ball-tube mills // Scientific Bulletin of NSU. – Dnipro, 2018. – №5(167). – P. 39-47. (in English) <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/5>.*
5. *Kalashnikov V.A., Golovko L.G., Stoyko A.V., Dyrda V.I., Khmel I.V. Dezintegraciya zheleznoj rudy v sharovykh mel'nicax s rezinovoj futerovkoj [Disintegration of iron ore in ball mills with rubber lining]. // Geotexnicheskaya mexanika = Geotechnical Mechanics. – 2017. – Issue 133. – P. 90-102. (in Russian)*
6. *Kalashnikov V.A., Golovko L.G., Dyrda V.I., Ahaltsov H.N. Nekotorye problemy sozdaniya e'nergosberegayushhix rezinovykh futerovok sharovykh rudoizmel'chitel'nykh mel'nic [Some problems of creating energy-saving rubber lining of ball ore-grinding mills]. // Gornyj zhurnal Kazaxstana = Mining Journal of Kazakhstan. – Almaty, 2019. – №8. – P. 46-49. (in Russian)*
7. *Dyrda V.I. Teoriya volnovogo abrazivno-ustalostnogo iznosa uprugonasledstvennykh sred [The theory of wave abrasive-fatigue wear of elastic hereditary media]. // Geotexnicheskaya mexanika = Geotechnical mechanics. – 2013. – Issue 113. – P. 133-144. (in Russian)*
8. *Kalashnikov V.A., Golovko L.G., Dyrda V.I., Stoyko A.V., Khmel I.V. Rezinovaya futerovka sharovykh mel'nic v novoj resurso- i e'nergosberegayushhej texnologii izmel'cheniya krepkix rud [Rubber lining of ball mills in a new resource and energy saving technology for crushing strong ores]. // Chernaya metallurgiya = Ferrous metallurgy. – 2016. – Issue 1(1393). – P. 70-74. (in Russian)*
9. *Dyrda V.I., Kalashnikov V.A., Stoyko A.V., Khmel I.V. Dinamicheskaya model' volnovogo abrazivno-ustalostnogo razrusheniya rezinovoj futerovki v barabannykh mel'nicax [Dynamic model of wave abrasive-fatigue destruction of rubber lining in drum mills]. // Geotexnicheskaya mexanika = Geotechnical Mechanics. 2012. Issue. 106. P. 15-24. (in Russian)*

Сведения об авторах:

Калашников В.А., инженер, директор Общества с ограниченной ответственностью «НПП Валса ГТВ» (г. Белая Церковь, Украина), v.kalashnikov@valsa-nvp.com; **ORCID** 0000-0002-0007-7927

Головко Л.Г., инженер, главный инженер Общества с ограниченной ответственностью «НПП Валса ГТВ» (г. Белая Церковь, Украина), *chief. eng@valsa-gtv.com*; **ORCID** 0000-0002-5957-9040

Дырда В.И., д-р техн. наук, профессор, заведующий отделом механики эластомерных конструкций горных машин Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (г. Днепр, Украина), vita.igtm@gmail.com; **ORCID** 0000-0002-2113-816X

Агальцов Г.Н., инженер, младший научный сотрудник отдела механики эластомерных конструкций горных машин Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (г. Днепр, Украина), ag.gena@gmail.com; **ORCID** 0000-0001-6296-7573

Авторлар туралы мәліметтер:

Калашников В.А., инженер, «SIC VALSA GTV» Жауапкершілігі шектеулі қоғам директоры (Белая Церковь к., Украина)

Головко Л.Г., инженер, «SIC VALSA GTV» Жауапкершілігі шектеулі қоғам бас инженері (Белая Церковь к., Украина)

Дырда В.И., техника ғылымдарының докторы, профессор, Поляков атындағы Украина Ұлттық ғылым академиясының геотехникалық механика институты, Тау-кен машиналарының эластомерлік құрылымдарының механикасы кафедрасының менгерушісі (Днепр к., Украина)

Агальцов Г.Н., инженер, Поляков атындағы Украина Ұлттық ғылым академиясының геотехникалық механика институты, Тау-кен машиналарының эластомерлік құрылымдары механикасы бөлімінің кіші ғылыми қызметкері, (Днепр к., Украина)

Information about the authors:

Vyacheslav A. Kalashnikov, Master of Science, Director of the «SIC VALSA GTV» Limited Liability Companies (Bila Tserkva, Ukraine)

Lubov G. Golovko, Master of Science, Chief Engineer of the «SIC VALSA GTV» Limited Liability Companies (Bila Tserkva, Ukraine)

Vitalii I. Dyrda, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head at the Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines of the Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of the National Academy of Sciences of Ukraine (Dnipro, Ukraine)

Hennadii M. Ahaltsov, Master of Science, Junior Researcher at the Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines of the Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of the National Academy of Sciences of Ukraine, (Dnipro, Ukraine)