

4. Булат-Корнейчук Е.А., Дырда В.И. Научные открытия в механике разрушения. – Киев; Днепропетровск, 2006. – 246 с.
5. Хакен Г. Синергетика. – М.: Мир, 1980. – 404 с.
6. Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах. – М.: Мир, 1979. – 278 с.
7. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. – М.: Мир, 1979. – 308 с.
8. Шустер Г. Детерминированный хаос. – М.: Мир, 1988. – 240 с.
9. Томпсон Дж. Неустойчивости и катастрофы в науке и технике. – М.: Мир, 1985. – 255 с.
10. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. – М.: Прогресс, 1986. – 432 с.
11. Пригожин И. От существующего к возникающему. – М.: Мир, 1985. – 216 с.
12. Ланда П.С., Трубецков Д.И., Гусев В.А. Заблуждения и реальность в некоторых задачах физики (теория и эксперимент) // Успехи физических наук. – 2009. – № 179. – С. 255-277.
13. Гейзенберг В. Шаги за горизонт. – М.: Прогресс, 1987. – 368 с.
14. Делез Ж., Гваттари Ф. Что такое философия? – СПб.: 1998. – 329 с.
15. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. – М.: Ин-т компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
16. Можейко М.А. Постмодернизм // История философии. Энциклопедия. – Минск, 2002.
17. Постмодернизм и культура. Материалы круглого стола // Вопросы философии. – 1993. – № 3. – С. 3-16.
18. Гегель Г. Энциклопедия философских наук. Т. 2. Философия природы. – М.: Мысль, 1975. – 696 с.
19. Кант И. Антропология с прагматической точки зрения. – М.: Мысль, 1966. – Т. 6. – 742 с.
20. Маньковская Н.Б. Эстетика постмодернизма. – СПб.: Алетейя, 2000. – 164 с.
21. Булат А.Ф., Дырда В.И., Звягельский Е.Л., Кобец А.С. Прикладная механика упруго-наследственных сред. В 3-х томах. – К.: Наук. думка, 2011. – Т. 1. Механика деформирования и разрушения эластомеров. – 2011. – 463 с.
22. Булат-Корнейчук Е.А., Дырда В.И. Научные открытия в механике разрушения: философские проблемы и постмодерн // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. – 2007. – Вып. 70. – С. 3-16.

УДК 622.23:05459

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

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОЛНОВОГО АБРАЗивно-УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ РЕЗИНОВОЙ ФУТЕРОВКИ В БАРАБАНЫХ МЕЛЬНИЦАХ

Розглядається динамічна модель хвильового руйнування гумових футерівок кульових млинів при абразивно-втомлюваному руйнуванні.

DYNAMIC MODEL OF WAVE ABRASIVE FATIGUE FAILURE OF THE RUBBER LINING IN RATTLERS

The dynamical model of wave failure of rubber linings of ball mills under abrasive fatigue destruction is considered.

В своей известной книге «Футеровки шаровых мельниц», изданной в 1965 году Д.К. Крюков, пожалуй, первым отметил, что в барабанных шаровых рудоизмельчительных мельницах металлические футеровочные плиты изнашиваются по кривой, близкой к логарифмической спирали [1]. На основе этого автор предложил конструкцию металлической футеровки, рабочая поверхность которой выполнена по логарифмической спирали (т.н. футеровка Крюкова). Однако преимущества перед другими футеровками волновые плиты не имели, т.к. расстояние между волнами выбиралось произвольно без учёта динамики мельницы. Позже авторы работ [2, 3] подтвердили характер износа металлической футеровки по логарифмической спирали.

Известно [3], что процесс разрушения металла и резины при ударных нагрузках и абразивно-усталостном износе имеет различную природу и существенные отличия. Однако имеются и общие закономерности, вызванные спецификой взаимодействия технологической загрузки и футеровки. Прежде всего, это касается волнового характера износа. В резине на его кинетику существенное влияние оказывает диссипация энергии; в металлах диссипация на два порядка меньше (0,003-0,03

против 0,5-0,8 в резине) и поэтому такие специфические особенности как естественная волна износа и характер речного узора русла футеровки выражаются более явно. Поэтому представляет известный интерес сравнить появление этих характерных признаков разрушения для двух футеровок, резиновой и металлической при работе в одинаковых условиях.

Механизм разрушения металлической футеровки

В качестве примера рассмотрим характер разрушения металлической футеровки, одноволнового типа из марганцовистой стали 110Г13Л на шаровой мельнице МШЦ 5,5×6,5. Геометрические размеры плит были соизмеримы с резиновыми, поэтому шаг укладки их был одинаков – расстояние между центрами плит 465 мм. Металлические плиты имели ребристую поверхность, высоту 230 мм и угол сектора укладки плит 10°. Долговечность металлической футеровки до отказа составляла 6÷7 месяцев (4300-5000 ч).

В процессе эксплуатации металлическая футеровка приобретала волновую форму, показанную на рис. 1; наблюдалось практически отсутствие речного узора и чёткая асимметрия волн, т.е. расстояние между выступами соседних волн отличалось на 10 % и более. Наблюдалась асимметрия износа по длине мельницы: в зоне разгрузки – износ был меньше, чем в центральной части примерно на 60-100 мм.

В металлической футеровке наблюдался также износ плит в виде поперечных (относительно направления движения потока) кольцевых ручьёв (рис. 2). Такая волнообразная форма износа связана в первую очередь с многократным взаимодействием металлических шаров с футеровкой в области пяты отката: турбулентное движение пульпы с наличием шаров создавало мощное структурное образование – двухфазный монодисперсид. Его движение способствовало появлению своеобразных морфометрических признаков: поперечных волн износа с чётко вы-

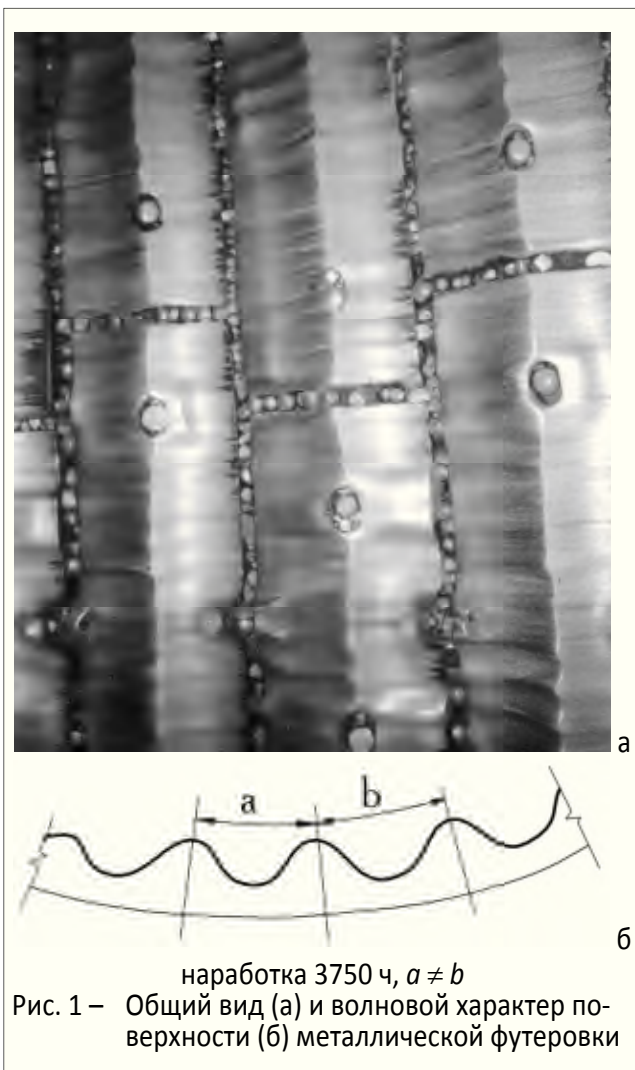


Рис. 1 – Общий вид (а) и волновой характер поверхности (б) металлической футеровки

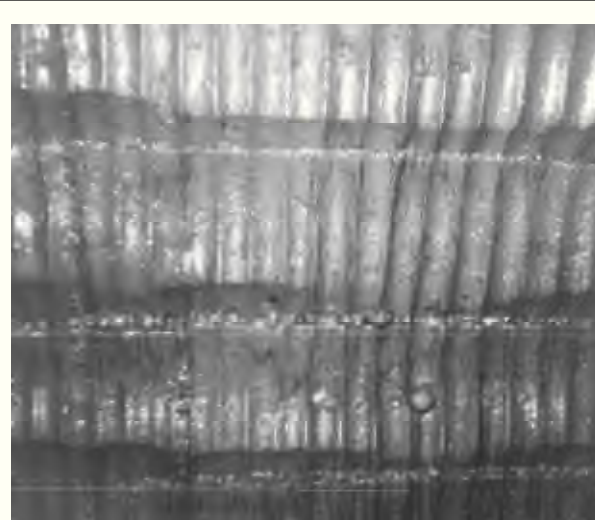


Рис. 2 – Износ металлической футеровки в виде кольцевых ручьёв (СП «Эрдэнэт», мельница МШЦ 5,5×6,5)

раженной асимметрией по длине. Аналогичное явление наблюдал Д.К. Крюков [1]. В металлической футеровке износ может иметь и другие геометрические формы, например, в виде кольцевых последовательно расположенных полусферических лунок.

В резиновой футеровке на второй и третьей стадии измельчения благодаря эластичности и высокой диссипации энергии материала такие формы износа не наблюдались.

Механизм разрушения резиновой футеровки

Разрушение футеровки проходило в основном по абразивно-усталостному механизму. При взаимодействии футеровки с загрузкой происходило разрушение её поверхностного слоя как за счёт абразивного износа, т.е. за счёт истирания и массопереноса резины, так и за счёт процессов усталости от многократных ударов и вдавливания контртел, т.е. металлических шаров и кусков материала.

Процессу разрушения футеровки способствовали большие напряжения, возникающие в области внедрения контртела в резиновый массив, что сопровождалось, как правило, довольно высокой локальной температурой в «характерных» объёмах за счёт экзотермических эффектов.

При абразивно-усталостном характере износа каждый раз после удаления определённой толщины массива футеровки вследствие истирания возникал новый слой резины с изменённой структурой. Эти изменения для рассматриваемого случая были комплексными: часть из них обусловлена тепловым ударом, а часть – усталостными процессами от многократных ударных нагрузок.

В конечном итоге поверхность футеровки по диаметру барабана приобрела волновую форму (рис. 3), а по руслу форма имела вид речного узора. Поверхность износа имела характерные морфометрические признаки: по длине волн износа наблюдалась асимметрия, т.е. расстояние между выступами волн изменялось по закону случайностей; аналогично изменялись и высоты гребней волн (на рис. 3 показаны в виде остаточной толщины футеровки). Вместе с тем геометрическая форма волн износа повторялась практически для всех плит футеровки. Такая квазисимметрия геометрических форм износа футеровки и асимметрия (около 10-15 % разброс) её морфометрических показателей свидетельствуют о следующем: с одной стороны в барабане мельницы наблюдалось единство структурных образований загрузки и повторяемость их формы и размеров во времени; с другой стороны – турбулентность пульпы, неравномерность движения барабана и пульсации загрузки вносили элемент случайности, что и проявлялось в характере асимметрии волнообразного износа футеровки и в ритме речного узора её поверхности. Геометрическая форма поверхности износа резиновых плит футеровки для рассматриваемой мельницы может быть описана логарифмической функцией. Рассмотрим конкретный пример. Показанная на рис. 3 профилограмма износа резиновой футеровки плита-плита (шаг укладки совпадал с шириной плит и равнялся 465 мм, максимальная толщина плит 160 мм) была получена при эксплуатации мельницы МШЦ 5,5×6,5. Если разместить координаты так как это показано на рис. 3, то хорошо видно, что кривая *СAB* почти симметрична относительно оси *y* и имеет две точки перегиба *С* и *В*. Такая кривая удовлетворительно описывается логарифмической функцией вида

$$y = b \exp \left[-(ax)^2 \right].$$

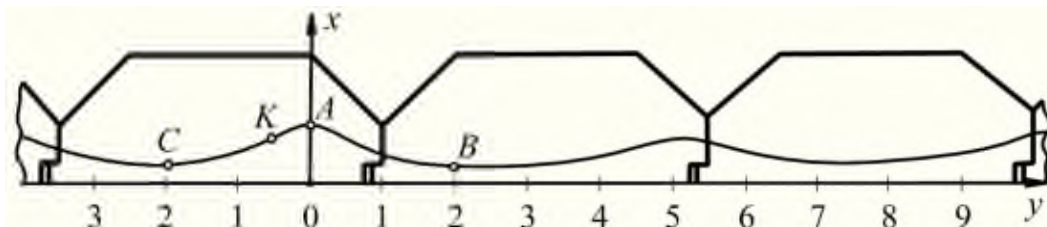


Рис. 3 – Профилограмма износа резиновой футеровки типа плита-плита на мельнице МШЦ 5,5×6,5

Для конкретной резиновой футеровки (рис. 3) значения параметров следующие: $b = 10$, $a = 0,05$. Здесь имеется также частный случай: при $b = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$, $a = \sigma/\sqrt{2}$ получаем гауссову кривую – кривую нормального распределения. Это весьма важный экспериментальный результат, т.к. при дальнейших расчётах геометрических параметров резиновых плит и их долговечности с учётом вероятностного характера разрушения можно использовать именно нормальное распределение.

Кривая САВ удовлетворительно описывается также алгебраической кривой типа локон Аньези с уравнением $(x^2 + a^2)y - a^3 = 0$.



Рис. 4 – Волновой характер футеровки «G.M-волна» после 4-х месяцев наработки; СевГОК, мельница $\varnothing 3,6$ м, первая стадия измельчения, шары $\varnothing 100$ мм

На рис. 4 показана плита резиновой футеровки «G.M-волна» с металлическими шипами предприятия ООО «Валса – ГТВ», поверхность износа которой подчиняется кривой типа локон Аньези.

Закономерность волнового движения внутримельничной загрузки в барабане мельницы

Как уже отмечалось [3], движение внутримельничной загрузки в барабане мельницы обладает сложной иерархической структурой с турбулентным движением пульпы и вихреобразным пульсирующим движением загрузки; в целом процесс движения носит стохастический и нелинейный характер. Турбулентность как нерегулярное поведение нелинейной системы непосредственно связана с детерминированным многомерным хаосом и характеризуется сложным пространственно-временным поведением.

В механике [4] под детерминированным хаосом понимают нерегулярное или хаотическое движение, вызванное нелинейностью среды, для которой динамические законы движения однозначно определяют эволюцию во времени состояния системы. В барабане мельницы будет наблюдаться сдвиговая турбулентность пульпы, особенно на разделе фаз пульпа-футеровка; при этом детерминированный хаос может возникать в локальных областях сегмента загрузки.

Таким образом, движение внутримельничной загрузки можно рассматривать как движение открытой системы, имеющей большие отклонения параметров от равновесного состояния, нелинейность основных характеристик и кооперативное поведение подсистем, т.е. поведение постоянно возникающих в сегменте новых пространственно-временных структур. Такие структуры будут возникать в результате влияния ряда взаимосвязанных между собой факторов: турбулентного движения пульпы; скольжения загрузки относительно футеровки и возникновению благодаря этому фрикционных колебаний; большой диссипации энергии сегмента загрузки; поворотной асимметрии движения барабана в результате несимметричного распределения загрузки и несовершенства конструкции и т.д. Форма структурных образований в объёме мельницы может иметь определённую закономерность в силу существования всеобщей формообразующей тенденции (более подробно рассматривается ниже), а их размеры будут изменяться по законам случайностей. Из всех вновь образованных структур более устойчивыми будут те, для которых будет соблюдаться принцип минимума диссипации. Следует подчеркнуть существенную роль диссипации в динамике внутримельничной загрузки: диссипация лежит в основе гидродинамических пульсаций загрузки и в основе механизма формообразования сегмента загрузки; часть диссипируемой энергии превращается в тепловую и нагревает загрузку, что уменьшает вязкость пульпы и тем самым изменяет коэффициент скольжения, и негативно сказывается на долговечности футеровки. Особенно следует отметить большую роль диссипации энергии во взаимодействии сегмента загрузки с резиновой футеровкой: взаимное приспособление потока и русла футеровки порождает определение гидроморфологических зависимостей, характеризующих как скоростное поле потока в локальных областях, так и морфометрические характеристики рельефа футеровки. Из всех возможных вариантов реализуются лишь те, при которых поток затрачивает наименьшее количество энергии, т.е. диссипация энергии системы должна быть минимальной.

Согласно [5, 6] в таких неравновесных системах, обладающих нелинейностью и большой диссипацией, всегда существуют флуктуации, способные привести к образованию новых типов структур и функциональных связей.

Экспериментально установлено [3], что на стыке загрузки и футеровки наблюдается мощное структурное образование (т.н. монодисперсид), вызванное турбулентным движением пульпы. Это структурное образование обладает нестабильно-

стью формы и размеров, ему присуща неустойчивость движения. В объёме монодисперсоида находится пульпа, металлические шары и измельчаемый материал различной крупности; всё это вместе благодаря турбулентности находится в псевдосжиженном (кипящем) состоянии. Квазиустойчивость формы и размеров монодисперсоида в течение определённого времени определяется скоростью движения барабана, степенью его заполнения, величиной скольжения загрузки относительно футеровки (коэффициентом трения), вязкостью пульпы и рельефом футеровки. Это структурное образование является одним из основных факторов разрушения резиновой футеровки, т.к. именно в его объёме металлические шары или крупные куски измельчаемого материала непосредственно соприкасаются с поверхностью футеровки; при этом сами шары имеют интенсивное хаотическое движение. Поэтому в зоне контакта наблюдается различные виды нагружения резиновой футеровки: удар, вдавливание и абразивно-усталостный износ. Такое утверждение не противоречит исследованиям Д. Крюкова и П. Малярова.

Явление детерминированного хаоса вместе с другими эффектами (диссипация энергии системы, турбулентное движение пульпы, пульсационный характер движения барабана и др.) лежит в основе волнообразного движения внутримельничной загрузки и принципа локального разрушения элементов футеровки. В массивных резиновых элементах (плиты, лифтёры) с неоднородным полем напряжений накопления повреждений на поверхности и в объёме будет также неоднородным. Поэтому при прочих равных условиях (режим нагружения, внешняя среда и т.д.) место и время появления очагов разрушения носит вероятностный характер. В практике это выражается в виде неодинакового износа рядом расположенных плит или лифтёров, в различных морфометрических особенностях поверхности разрушения и различной долговечности до отказа.

Важную роль играет также эффект поворотной асимметрии движения барабана и пульсационный характер его вращения; в результате этих воздействий нарушается симметрия волн и задаётся определённый ритм речного узора [3].

Согласно законам гидродинамики уже в силу одной турбулентности потока плоское русло футеровки превращается в волнообразное [7].

Длительные промышленные испытания мельниц с резиновой футеровкой показали, что между структурной формой турбулентности потока и морфометрическими особенностями рельефа футеровки существует теснейшая связь. Поток и футеровка находятся в определённом взаимодействии и представляют собой некоторое единство двух взаимоположенных сторон одного и того же явления, т.е., механическая сущность процесса движения загрузки может быть сведена к взаимодействию потока и футеровки: поток управляет рельефом футеровки, а футеровка, в свою очередь, управляет потоком. Такое взаимодействие происходит в некотором пространственно-временном континууме: влияние рельефа футеровки непосредственно и очень быстро передаётся скоростному полю, геометрическим формам и размерам структурных образований потока. Обратное же влияние, т.е. влияние потока на формирование рельефа футеровки, осуществляется в течение сравнительно длительного периода времени, определяемого главным образом структурными особенностями потока и механическими характеристиками футеровки. К тому же, такое влияние не остаётся постоянным в течение длительного времени; благодаря износу в резиновой футеровке изменяется и рельеф и геометрические размеры, а, следовательно, будут изменяться и структурные особенности потока.

Таким образом, рельеф футеровки находится в определённой зависимости от структуры потока и является в известном смысле 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.

Такая взаимная приспособляемость потока и футеровки в реальных условиях происходит в течение некоторого времени, иногда несколько сот часов. Именно в это время наблюдается снижение производительности мельниц; после установления определённого равновесия между футеровкой и потоком мельница выходит на оптимальный режим работы.

В конечном итоге появляются такие гидроморфологические характеристики потока и такой морфометрический рельеф футеровки, при которых поток на преодоление всех сопротивлений затрачивает минимум энергии или минимум диссипации. Т.е. из всех возможных структурных образований потока реально осуществляются лишь те, для которых наблюдается минимальное рассеяние энергии. В установившемся движении мельницы наблюдается именно такое структурное образование потока, которое соответствует этому принципу (принцип Рэлея-Гельмгольца).

Отсюда вытекает непосредственная задача для конструкторов: необходимо выбрать такую геометрическую форму резиновой футеровки, которая появляется с течением времени в результате достижения некоторого гармонического равновесия между потоком и рельефом футеровки.

Как видно, диссипация энергии играет существенную роль, как в формировании морфометрического рельефа футеровки, так и в формировании русла потока; она не только задаёт размеры и симметрию волн футеровки, но и формирует ритм речного узора. Рассмотрим примеры такого формирования для мельницы МШЦ 5,5×6,5.

В первом случае использовалась металлическая футеровка одноволнового типа с ребристой поверхностью. В процессе эксплуатации рабочая поверхность футеровки приобретала волновую форму (рис. 5); при этом наблюдалась чёткая асимметрия волн (расстояние между выступами соседних волн отличалось на 10 % и более) и практическое отсутствие речного узора. Во втором случае использовалась резиновая футеровка плита-плита с нишами трапециевидной формы. В процессе эксплуатации рабочая поверхность футеровки приобретала волновую форму (рис. 6); при этом также наблюдалась асимметрия волн и речной узор русла. Как видно, металлическая футеровка взаимодействовала с потоком как упругое тело с незначительной диссипацией энергии; отсюда чёткая геометрическая симметрия волн (асимметрия наблюдалась только в различии длины между выступами волн) и отсутствие речного узора. Резиновая футеровка как вязкоупругая сильно диссипативная среда более гибко реагировала на турбулентный поток; отсюда не только асимметрия волн, но и определённый ритм речного узора. Всё это подтверждает наличие эффекта гидроподушки на разделе фаз загрузка-футеровка с мощной турбулентностью потока, с вихреобразным спиралевидным движением пульпы. Несмотря на вероятностную природу возникновения и угасания пульсаций, появление и гибель структур, движение сегмента загрузки, тем не менее, подчиняется некоторой строгой закономерности, некоторой динамической асимметрии, проявляющейся в определённой формообразующей тенденции. Такая тенденция существует в пространственно-временном континууме и её проявление, безусловно, должно

выражаться через универсальные постоянные. Параметры такого объёмно-пространственного процесса трудно определить экспериментально и они проявляются лишь в форме вторичных структурных образований, т.е. отпечатков на поверхности футеровки; волн, речного узора и других морфометрических особенностей.

Используя изложенную динамическую модель взаимодействия футеровки с монодисперсоидом загрузки конструкторы могут создавать такие морфологические формы элементов футеровки (плит и лифтёров), которые способны обеспечивать не только подъем шаров, но и заданный ритм турбулентного потока пульпы. Если при этом различия по высоте впадин и выступов на пути потока (т.е. изрезанность рельефа поверхности футеровки), а также расстояние между ними будут согласованы со структурой и скоростью движения монодисперсоида загрузки, то в барабане мельницы установится глобальное равновесие (внутри потока равновесие возможно лишь случайно и на короткое время), что и будет соответствовать режиму измельчения материала с минимальным потреблением энергии.

Если же такой согласованности не будет наблюдаться, то механизм самоорганизации монодисперсоида загрузки, подчиняясь в целом второму началу термодинамики (т.е. из всех движений реализуются лишь те, которые производят минимум энергии) приведут к такому характеру движения, при котором в потоке будет устанавливаться множество случайных стохастических, существующих непродолжительное время, состояний. Это, в свою очередь, приведёт к повышенному абразивно-усталостному износу резины, а иногда и к катастрофическому её разрушению.

В конечном итоге (иногда это может произойти непосредственно перед отказом футеровки) между загрузкой и поверхностью резины установится некоторое квазиустойчивое равновесие; визуально это выразится в том, что на рабочей поверхности резины будет наблюдаться речной узор, иногда неполная и не совсем чёткая волна естественного износа. Т.е. при эксплуатации всех возможных форм футеровки движение загрузки будет стремиться к некоторому устойчивому состоянию, формируя при этом русло потока (в данном случае поверхности футеровки) таким образом, чтобы соблюдался принцип минимума потребления энергии. Поэтому задача конструкторов и технологов, как уже отмечалось выше, заключается

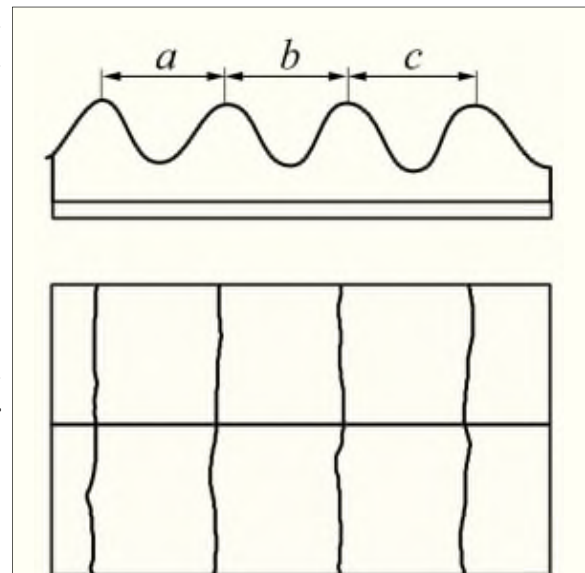


Рис. 5 – Волновой характер износа металлической футеровки с эффектом асимметрии длин волн ($a \neq b \neq c$) и практически симметричным характером волн по руслу

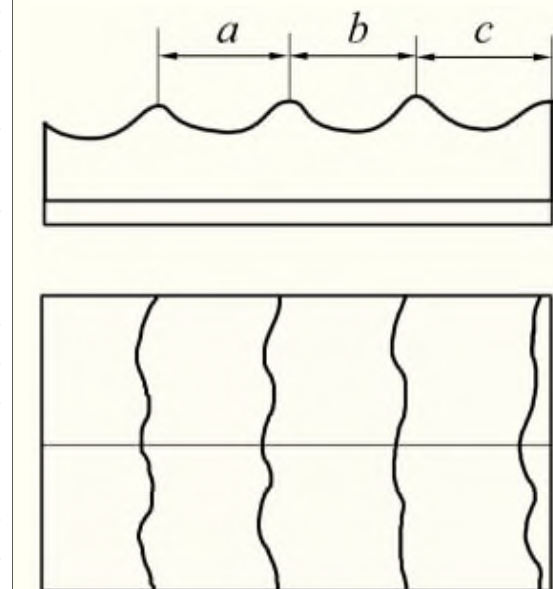


Рис. 6 – Волновой характер износа резиновой футеровки с эффектом асимметрии длин волн ($a > b > c$) и речным узором русла

именно в том, чтобы, используя аналитические расчёты и накопленный опыт, создать резиновые футеровки с такими морфометрическими и геометрическими параметрами, чтобы уже на первом этапе работы мельницы между загрузкой и футеровкой установилось устойчивое равновесное состояние, что и будет способствовать при соблюдении оптимальности технологического процесса минимальному износу футеровки.

Результаты длительных лабораторных и промышленных исследований механики деформирования и разрушения резин, динамики взаимодействия технологической загрузки и футеровки в барабанных мельницах, механизмов разрушения элементов футеровок (особенно в промышленных условиях), а также результаты исследований турбулентного движения на морфометрические формы резиновых элементов и их абразивно-усталостный износ позволили создать теорию расчёта и выбора оптимальных параметров элементов защитных футеровок [3]. Эта теория и разработанные практические рекомендации были положены в основу создания принципиально новых оригинальных конструкций резиновых футеровок: футеровки «плита – лифтёр» и «плита – плита»; для более тяжёлых условий эксплуатации элементы футеровок включают в себя металлические вставки – специальные шипы, присоединяемые к резиновой матрице в процессе вулканизации. Морфометрические и геометрические параметры резиновых элементов и их раскладка в барабане мельницы выполнены согласно разработанным методикам таким образом, что в процессе эксплуатации мельницы вплоть до отказа футеровки сохраняется волновой характер износа резиновых элементов. При этом длина волны практически соответствует длине волны естественного износа резины, определяемой аналитически; в этом случае соблюдается принцип минимального потребления энергии, минимального абразивно-усталостного износа и максимальной долговечности футеровки.

На сегодняшний день такие резиновые футеровки выпускает серийно предприятие ООО «ВАЛСА-ГТВ» (г. Белая Церковь); футеровки являются наиболее перспективными и конкурентоспособными на рынке услуг для шаровых мельниц всех типов, включая мельницы первой стадии измельчения с шарами диаметром 100 мм. Предприятие выпускает более шестидесяти видов различных футеровок для мельниц всех стадий измельчения: «Плита – Волна», «Г.М. – Волна», «Плита – лифтёр – Волна» и другие.

Самофутерующаяся резиновая футеровка «Плита – Волна» на шаровых мельницах 2 и 3 стадии измельчения позволяет: снизить массу комплекта футеровки более чем в 3-5 раз; снизить расход мелющих тел на 6-10 %; уменьшить потребление электроэнергии на 7-9 %; увеличить срок службы на 80-150 %; увеличить продолжительность межремонтных циклов в два раза.

Выводы

1. Длительная практика показала, что независимо от конструкции футеровки, режима движения барабана и механических характеристик обрабатываемой среды динамическое взаимодействие сегмента загрузки и футеровки неизбежно приведёт к образованию волнового профиля её элементов и речного узора по длине барабана.

Рельеф футеровки будет определяться в основном структурой потока, его турбулентностью и диссипативными свойствами среды. Именно турбулентность и диссипация энергии играют доминирующую роль как в формировании морфометрического рельефа футеровки, так и в формировании ритма речного узора. В результате

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