

## **НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНЫХ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ФУТЕРОВОК БАРАБАННЫХ МЕЛЬНИЦ**

Розглянуто взаємозв'язок науки та технології у контексті створення нових прогресивних гумових футеровок млинів, що є стійкими до абразивно-втомлюваного зносу.

### **SOME PROBLEMS OF CREATION OF COMPETITIVE POWER SAVING UP LININGS OF TUMBLING MILLS**

The intercoupling of a science and technique in a context of creation of new progressive rubber linings of grinding mills, resistant to abrasive-fatigue deterioration is reviewed.

#### **1 Введение**

Резиновые футеровки получили широкое распространение в инженерной практике для защиты машин и механизмов от ударных нагрузок и абразивного износа. О важности проблемы свидетельствует обширная литература, обзор которой дан в [1-12]. Особенно перспективно использование резины в шаровых рудоизмельчительных мельницах, в которых футеровка играет весьма важную роль: во-первых, как элемент защиты от износа и ударных нагрузок и, во-вторых, как элемент, физико-механические и морфометрические параметры которого влияют непосредственно на процесс измельчения материала. От ее морфометрических параметров и долговечности зависят не только срок службы мельниц в целом, но и их технологические характеристики. Начиная с середины прошлого века, резина стала вытеснять лучшие сорта стали, чему способствовали ее несомненные достоинства: стойкость к абразивно-усталостному износу, технологичность изготовления, простота монтажно-демонтажных работ и т.д. Поэтому когда говорят о достоинствах резиновых футеровок, то всегда в качестве сравнения приводят металлические футеровки.

При создании резиновых футеровок большую роль играет союз науки и технологии, а также опыт лабораторных и промышленных испытаний. Этот опыт обычно является результатом длительных исследований, которые далеко не всегда бывают положительными, а зачастую и весьма дорогостоящими. Поэтому многие фирмы ограничивают публикацию своих исследований и довольствуются публикацией результатов либо сугубо теоретических, кстати, крайне редких, либо научной рекламой. При этом довольно часто желаемое выдается за действительное, а причины и следствия смешиваются. Наиболее тщательно скрывается рецептура резин, технология изготовления элементов футеровки и номограммы срока службы резины в зависимости от режима работы мельниц и свойств перерабатываемого сырья. Наиболее конкурентоспособными являются конструкции футеровок тех предприятий, которые для решения проблемы привлекают как специалистов в области резины (механиков, технологов), так и специалистов в области дезинтеграции минерального сырья, в том числе и экономистов.

Настоящая статья посвящена рассмотрению некоторых проблем, определяющих стратегию и тактику создания конкурентоспособных энергосберегающих резиновых футеровок с акцентированием внимания на союзе науки и технологии в контексте создания новых прогрессивных футеровок, например, таких как «плита – плита» и «плита – лифтер» конструкции ООО «ВАЛСА-ГТВ» (конструкция «непрерывная волна»).

По данным ООО «ВАЛСА-ГТВ» мельницы с резиновой футеровкой по сравнению с мельницами, оборудованными металлической футеровкой, имеют явное преимущество по основным технологическим параметрам, а именно:

- обеспечивают заданную производительность уже с первых часов работы;
- обеспечивают снижение удельного расхода шаров на 5-10 % в основном за счет снижения контактных напряжений в момент удара;

- создают возможность ведения процессов измельчения без нарушения технологических показателей при меньшем объеме шаров;
- позволяют увеличить производительность по питанию до 7-12 % без ухудшения технологических показателей;
- позволяют снизить потребляемую мощность (т.е. расход электроэнергии) за счет снижения величины объема шаров;
- позволяют снизить удельный расход электроэнергии на 5-8 % за счет ведения процессов измельчения с принятым на фабрике шаровым заполнением мельницы, но с увеличением исходного питания и выходом более тонкого помола;
- следы износа футеровки не оказывают отрицательного воздействия на последующие технологические процессы обогащения золота и урана.

Резиновые футеровки по сравнению с металлическими имеют больший срок службы:

- на 30-75 % при использовании шаров диаметром 100 мм;
- на 40-75 % при использовании шаров диаметром 80 мм;
- на 65-90 % при использовании шаров диаметром 60 мм;
- на 90-120 % при использовании шаров диаметром 40 мм или цельпепсов.

Во всех случаях применения резиновой футеровки типа «непрерывная волна» отмечаются следующие преимущества по сравнению с металлической футеровкой:

1. Время простоев мельниц для планового и внепланового ремонтов сокращается на 25-30 %.

2. Применение резиновой футеровки позволяет снизить себестоимость производства продукции на подготовительных работах на 4-5 %.

3. Повышение коэффициента использования мельниц (резиновая футеровка по сравнению с металлической имеет меньшую толщину) на 3-5 % позволяет увеличить выход продукта по готовому классу на 5-10 %.

4. Срок службы резиновых элементов футеровки превышает срок службы металлической футеровки в 2-3 раза.

5. Снижение массы футеровки в 2-5 раз по сравнению с металлической приводит к повышению срока службы опорных подшипников; меньший вес резиновой футеровки облегчает транспортировку, монтаж элементов и уменьшает риск несчастных случаев при ремонте и монтажно-демонтажных работах.

6. При использовании резиновой футеровки отсутствует утечка пульпы.

7. В отличие от металлической резиновая футеровка не требует частого осмотра и ремонта.

8. При использовании резиновой футеровки, по сравнению с металлической, шум уменьшается в 2-3 раза.

9. При использовании резиновой футеровки снижается расход мелющих тел.

10. Стальная футеровка требует частого осмотра, подтяжки болтов и ремонта; на резиновой футеровке болты не требуют подтяжки.

11. При экономической оценке процесса измельчения необходимо учитывать потерянную прибыль при остановке мельниц на обслуживание; экономические показатели работы футеровки необходимо рассматривать в совокупности с работой самой мельницы.

Такие успехи стали возможными при комплексном подходе к решению рассматриваемой проблемы. Рассмотрим некоторые составляющие этой проблемы в контексте союза науки и технологии.

## **2 Союз науки и технологии резины с точки зрения механика**

Между наукой и технологией всегда существовали барьеры, иногда небольшие, а порой труднопреодолимые. Серьезных публикаций по этой проблеме практически нет, а те сведения, что имеются в докладах на совещаниях и конференциях, носят отрывочный, порой противоречивый характер. Однако все научные работники, как механики,

так и технологи, сходятся в одном мнении: только при тесном союзе науки и технологии возможен прорыв в области создания более совершенных резиновых изделий (шин, защитных футеровок, транспортерных лент, силовых деталей и т.д.), крайне необходимых для современной техники.

Противоречие же заключается в следующем вопросе: что является более предпочтительным – развитие фундаментальной науки или ее технологическое приложение. Вопрос этот выходит за рамки настоящей статьи и касается практически всех сфер деятельности человечества. При этом справедливости ради следует отметить, что научное общество всегда встречает более благосклонно достижения в области фундаментальных наук, чем в области технологии.

До конца прошлого века такая точка зрения была господствующей; в наше время, т.е. во время постиндустриального общества, в котором господствуют элементы постмодернизма, эта точка зрения несколько изменилась. Постмодернизм характеризуется хаосом, плюрализмом мнений, нелинейностью мышления, новыми технологиями [13]. Вследствие своей ограниченности, постмодернизм осторожно относится к фундаментальной науке, его больше привлекает универсализм, массовое потребление, интернациональная наука, единое информационное пространство, доступность к информационным технологиям и т.д. Примеров тому множество. Вместе с тем следует отметить, что в области полимеров именно достижения фундаментальных наук по физико-химии и механике, полученные в прошлом веке, и сегодня позволяют инженерам создавать новые технологии. Однако такое положение вещей не может продолжаться долго, и исчерпание накопленных знаний, безусловно, приведет к отсутствию новых идей и, следовательно, к невозможности создавать конкурентоспособную продукцию.

Рассмотрим некоторые составляющие этой важной проблемы в контексте создания резиновых футеровок. Известно [1], что существуют, по крайней мере, три основных задачи, решение которых позволяет создать оптимальные конструкции резиновых элементов:

- выбор формы и геометрических параметров;
- выбор марки резины с заданными свойствами;
- определение срока службы в конкретных условиях.

Рассмотрим решение этих задач более подробно.

**1. Выбор формы и геометрических параметров.** Инженерная практика в результате длительных промышленных испытаний рекомендует наиболее широко известные резиновые футеровки с различными морфометрическими и геометрическими параметрами: «плита – плита» с нишами; «плита – плита» с металлическими вставками; «плита – лифтер» различных модификаций и т.д. Выбор подходящей конструкции футеровки должен осуществляться с учетом технологии измельчения материала, типа мельницы и особенностей перерабатываемой руды: ее твердости, прочности, крупности и т.д. В этом контексте фирмы-производители представляют набор уже апробированных конструкций; появление новых конструктивных форм требует не только больших экономических затрат, но и довольно длительного времени промышленных испытаний. В качестве примера можно привести эволюцию совершенствования форм защитных футеровок от футеровок типа «плита – лифтер», доминирующих в середине прошлого века (первые конструкции были представлены шведскими фирмами «Скега» и «Треллеборг» и использовались с шарами диаметром до 80 мм) до современных прогрессивных футеровок «плита – лифтер» и «плита – плита» с металлическими вставками (так называемая «непрерывная волна») конструкции ООО «ВАЛСА-ГТВ», которые позволяют эксплуатацию с шарами диаметром 100 мм (в перспективе диаметром 125 мм и стержнями) в том числе на мельницах первой стадии дробления. Однако для этого понадобилось более 60 лет.

**2. Выбор марки резины с заданными свойствами.** Здесь особенно необходим союз механиков, физико-химиков и технологов. В целом для выбора марки резины необходимо решить ряд задач:

- *выбор исходного полимера:* в этой области существенных изменений трудно ожидать; в настоящее время технологи могут представить самый широкий спектр каучуков и ингредиентов; прорыв следует ожидать в применении нанотехнологий (уже сейчас есть сажи с размером частиц около 40 нм) и литья под давлением (**формовые изделия, как показала практика, не отличаются необходимой долговечностью**);
- *определение деформационных параметров:* в этой области эксперимент является доминирующим; имеющиеся методы [14] вполне способны удовлетворить запросы технологов, прорыв возможен в автоматизации получения экспериментальных данных; здесь также очень важно использовать для получения реологических и диссипативных характеристик резин при деформациях простого сдвига специальные образцы типа БРМ101 [14]: стандартные образцы в виде двухсторонних лопаток для растяжения и пробок для сжатия позволяют получить некий условный модуль Юнга, который практически трудно использовать в расчетах жесткостных и диссипативных параметров футеровок и определения их долговечности;
- *исследования в области раздира или разрастания трещин:* здесь очень важно экспериментальное направление, позволяющее исследовать механизм этого вида разрушения и определять значение деформации для минимального или нулевого разрастания трещин; в конечном итоге это позволит получить данные об усталостной прочности элементов футеровки в зависимости от величины деформации и характеристик разрастания трещин; такие данные позволяют провести расчеты на стадии конструирования с целью определения максимальной усталостной прочности резины;
- *влияние гистерезиса:* в середине прошлого века была исследована роль гистерезиса, или диссипации энергии, на деформационные и прочностные свойства резин (обзор в [14]); было установлено, что диссипация существенно влияет на прочность резин, на самозалечивание и остановку трещин, на тепловые и усталостные характеристики и на старение; это привело к тому, что понятие «хорошая резина» стало включать реологические, теплофизические, диссипативные и усталостные характеристики;
- *разрушение резин от абразивно-усталостного износа:* как установлено ранее [12], для большинства барабанных мельниц основным видом разрушения резины является абразивно-усталостный износ; природа этого явления совершенно не изучена, о чем свидетельствует как отсутствие фундаментальных исследований, так и отдельные экспериментальные исследования: имеются стандарты на абразивный износ резины и стандарты на ее усталостные характеристики при многократных деформациях. Здесь следует отметить, что имеющиеся исследования износа резины (обзор дан в работах [1, 2, 12]) ограничиваются описанием механизма разрушения на уровне феноменологического подхода: математические уравнения описывают экспериментальные данные степенными или другими функциями, без какого-либо анализа и обобщения, зачастую такие данные носят противоречивый характер. Некоторые обнадеживающие результаты получены в работах [1, 2]; разработанный научный подход и результаты экспериментальных исследований позволили создать алгоритм расчета долговечности резиновой футеровки мельницы, достаточно удовлетворительно описывающий разрушение резины от абразивно-усталостного износа в реальных условиях эксплуатации. Таким образом установлено научное направление в области определения срока службы защитных футеровок – **сочетание фундаментальной науки и технологии**, а именно: сочетание лабораторных и промышленных испытаний резиновых футеровок, технологии создания резин с необходимыми характеристиками и фундаментальные исследования, учитывающие реологические, теплофизические, прочностные и усталостные свойства резин.

#### 4 Модель барабанной мельницы на основе универсальных принципов формообразования

В основу этой модели положены следующие фундаментальные и экспериментальные обобщения.

Фундаментальные обобщения.

1. Современная физика полагает, что в основе материального мира лежит принцип симметрии; все физические взаимодействия представляют собой проявление единого фундаментального взаимодействия, а симметрия служит основой этих взаимодействий.

2. Материальный мир имеет определенную «чувствительность» к числовым значениям универсальных постоянных, т.к. все его особенности определяются именно размерами этих постоянных.

Экспериментальные обобщения.

1. В процессе лабораторных и промышленных испытаний установлено [4, 5, 31, 34, 55, 58], что движение загрузки в барабане мельницы носит характер пульсаций. При этом условно можно видеть, по крайней мере, две основные пульсации: малая пульсация имела угол колебаний примерно  $1/3\alpha = 12^\circ$  и соответствовала длине идеальной волны движения загрузки, большая пульсация соответствовала углу колебаний примерно  $2\alpha = 72^\circ$ .

2. Движение загрузки (в ряде случаев только части ее) имело спиралеобразную вихреподобную форму; этот эффект характерен для всех барабанных мельниц с наличием пульпы.

3. На границе раздела фаз пульпа-футеровка гидродинамическое движение пульпы носило пульсирующий, волновой характер; при этом длина волны зависела от диаметра барабана, конструкции футеровки механических характеристик технологической загрузки, объема пульпы и т.д.

Все эти закономерности движения загрузки в барабанных мельницах были обнаружены не как случайные проявления конструктивных или технологических особенностей. В мельницах различной конструкции с металлической и резиновой футеровкой они повторялись с завидной последовательностью, что свидетельствует о существовании некоторого универсального отношения, характеризующего переход от неустановившегося (неупорядоченного, хаотического) движения сегмента загрузки к некоторому квазиупорядоченному (квазиустановившемуся) движению, когда на определенном промежутке времени устанавливается новое устойчивое структурное образование. Безусловно, такое структурное образование существует недолго и через короткий промежуток времени сменяется другим, с несколько отличной структурой; здесь следует подчеркнуть, что по форме многие структурные образования повторяются, и это дает возможность говорить о появлении во времени и пространстве самоподобных структур.

Известно, что такие универсальные отношения, характеризующие геометрическую форму и динамику ее развития, обычно связывают с законами формообразования, в основе которых лежит принцип золотой пропорции. Этот принцип основан на законах механики (прежде всего на законах потребления минимума энергии и производства минимума энтропии) и хорошо известен в архитектуре и технике. Существует пять основных принципов формообразования: целостность, симметрия, пропорции, ритм и главное в целом. Эти принципы находят отражение в формирующей тенденции материального мира – динамической симметрии относительно геометрической формы и движения любой системы, т.е. они, выступают в виде законов формообразования и позволяют соблюдать закономерность и системность; объединяющим началом является пропорция золотого сечения.

Обобщая известные данные о формообразовании материального мира, можно сделать следующие выводы:

- золотое сечение (золотое число 1,618 – гармоническое деление отрезка на неравные части, при которых весь отрезок так относится к большей части, как сама большая часть относится к меньшей) отображает математически своеобразную ритмичность функциональных структур; соблюдение правил золотого сечения позволяет создавать системы наиболее совершенные в структурном и функциональном смысле;
- числа Фибоначчи математически выражают принципы развития, связаны с общим законом сохранения энергии и характеризуют тенденции к оптимальному функционированию систем, т.е. к такому функционированию, когда соблюдаются принципы отбора по минимуму энергии, энтропии и т.д.
- принцип золотой симметрии выражает стремление любой системы к самоорганизации, к упорядочению;
- логарифмическая спираль с модулем  $\phi$  (золотая спираль, в которой от начала все последующие шаги увеличиваются в пропорциях золотого сечения; отношение чисел 0,618:0,382 дает непрерывное деление отрезка прямой в золотой пропорции, обозначается как модуль  $\phi$ ) является проявлением закона гармонического возрастания пульсаций в системе.

Используем эти фундаментальные положения для построения модели движения технологической загрузки в барабане мельницы. В этом случае золотую пропорцию как универсальное отношение наиболее целесообразно установить между условным значением динамического радиуса движения загрузки  $R_g$  (максимальным значением радиуса барабана до верхней границы плит футеровки для системы «плита-плита» и значением радиуса до верхней границы резиновых плит в системе «плита-лифтер») и длиной естественной волны износа. Конструктивно длина такой волны должна соответствовать расстоянию между центрами лифтеров или плит.

Для создания динамически совершенной системы, использующей минимум энергии, необходимо, чтобы геометрические размеры барабана мельницы (в основном внутренний диаметр) и шаг укладки элементов футеровки подчинялись основному формообразующему принципу, в данном случае принципу золотого треугольника (рис. 1, а) с  $\alpha = 36^\circ$ . В таком треугольнике отношение  $ab$  к  $ac$  равно 0,618, что соответствует рациональному числу Фибоначчи  $(\sqrt{5} - 1)/2$ . При этом числа Фибоначчи  $F_n$  определяются как

$$F_{n+1} = F_n + F_{n-1}; \quad F_0 = 0; \quad F_1 = 1; \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots,$$

для которых

$$\frac{F_n}{F_{n+1}} = \frac{F_n}{F_n + F_{n-1}} = \frac{1}{1 + \frac{F_{n-1}}{F_n}}. \quad (1)$$

При  $n \rightarrow \infty$  уравнение (1) дает  $F = (\sqrt{5} - 1)/2$ ; это число известно как золотое среднее, его можно определить при золотом сечении отрезка  $bc$ , т.е.

$$F = \frac{ab}{bc} = \frac{bc - ab}{ab} = \frac{\sqrt{5} - 1}{2} = 0,6180339.$$

Следует отметить, что угол малой пульсации загрузки соответствует  $\frac{1}{3}\alpha = 12^\circ$ , большой –  $2\alpha = 72^\circ$ . По-видимому, может существовать и средняя пульсация с  $\alpha = 36^\circ$ ; однако современными методами исследований обнаружить ее весьма затруднительно и, прежде всего, вследствие неустойчивости колебательного движения. О ее существовании свидетельствует волновой характер износа футеровки [2, 3, 12].

Если принять такую концепцию, подтвержденную экспериментально, то для мельниц при идеальной модели соотношение между динамическим радиусом движения загрузки  $R_g$  и длиной естественной волны износа можно выразить некоторым условным треугольником (рис. 1, б) с углом  $\varphi = \frac{1}{3}\alpha = 12^\circ$ . Сторона  $oa$  соответствует  $R_g$ , а

сторона  $ab$  – длине естественной волны, т.е. шагу укладки элементов футеровки. В этом случае справедливо соотношение

$$\ell_{\phi} = kR_g \operatorname{tg}\left(\frac{1}{3}\alpha\right) = 0,2126kR_g, \quad (2)$$

$$k = d_m \exp(-f_g \xi),$$

где:  $\ell_{\phi}$  – длина естественной волны износа футеровки;

$k$  – коэффициент корреляции;

$d_m$  – диаметр барабана мельницы;

$f_g$  – коэффициент взаимодействия загрузки с футеровкой;

$\xi$  – некоторая постоянная, характеризующая шаровую загрузку.

Коэффициент корреляции характеризует отклонение механического поведения реальной мельницы от идеальной модели. В принципе он характеризует все особенности взаимодействия внутримельничной загрузки с футеровкой, т.е. структурные образования в загрузке и ее пульсацию, турбулентное движение пульпы, поворотную асимметрию движения барабана, неравномерность подачи воды и сырья в барабан и т.д.

Коэффициент корреляции определяется опытным путем и для большинства рассматриваемых мельниц является линейной функцией диаметра барабана (рис. 2).

Следует также отметить, что в реальных условиях эксплуатации мельниц радиус движения загрузки не остается постоянным; по мере износа футеровки и уменьшения ее высоты он увеличивается.

Параметры естественной волны движения загрузки также являются величинами стохастическими и зависят от многих конструктивных и технологических факторов, присущих мельнице, футеровке и загрузке. Поэтому волна износа отличается от расчетной; она обладает асимметрией по диаметру барабана, а по длине мельницы ее морфология напоминает речной узор. В связи с этим коэффициенту корреляции  $k$  и придается смысл интегральной оценки всего спектра функциональных особенностей взаимодействия загрузки и футеровки.

В целом уравнение (2) позволяет на стадии проектирования установить оптимальный шаг укладки элементов футеровки в соответствии с принципами универсального формообразования, т.е. с такими принципами, которым соответствуют гармоническому соотношению между геометрическими размерами элементов мельницы (размеры барабана и футеровки) и динамическими параметрами движения загрузки.

При этом, безусловно, должно соблюдаться одно из основных требований: при выполнении мельницей функционального назначения по дезинтеграции материалов износ элементов футеровки ее, а следовательно, и их долговечность, должны быть

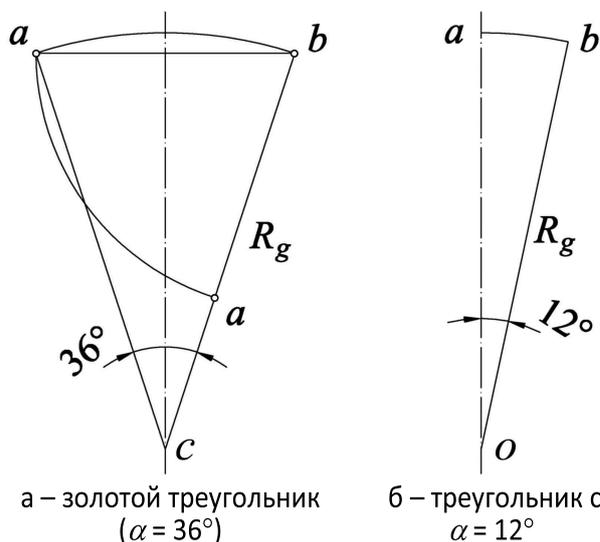


Рис. 1 – К выбору параметров футеровки

и придается смысл интегральной оценки всего спектра функциональных особенностей взаимодействия загрузки и футеровки.

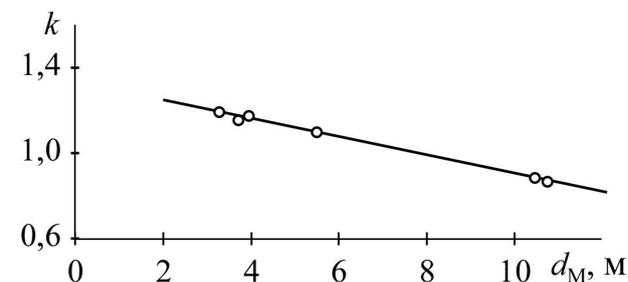


Рис. 2 – Зависимость коэффициента корреляции от диаметра барабана

оптимальными. Речь идет именно об оптимальной долговечности, т.к. для одной мельницы невозможно разрешить два важных противоречия. Первое связано с тем, что для максимального выхода исходного продукта требуется интенсивная технология, а значит, и более активное взаимодействие загрузки с футеровкой, что приводит к ее существенному износу; второе противоречие связано с качеством футеровки и, следовательно, с экономическими проблемами.

Поэтому в практике стараются найти оптимальное решение; вопросы долговечности элементов футеровки и их надежное функционирование при этом являются приоритетными.

Рассмотрим конкретные примеры.

Пример 1. Определим длину естественной волны износа в мельнице ММС 105×54 Сызраньского завода в условиях эксплуатации АК «АЛРОСА» при дезинтеграции алмазосодержащих руд: резиновая футеровка типа плита-лифтер «Полимет» имела следующие параметры  $R_g = 5,1$  м, длина естественной волны износа, наблюдаемая в мельнице после 3800 ч  $l_\phi = 0,85 \div 0,92$  м, расстояние между низкими лифтерами 0,916 м.

Из (2) при  $k = 0,80$  следует

$$l_\phi = 0,2126 \cdot 0,85 \cdot 5,1 = 0,86 \text{ м,}$$

что хорошо согласуется с опытными данными.

Для сравнения рассмотрим мельницу ММС 105×54 фирмы «Сведала» с аналогичными размерами барабана; резиновая футеровка типа плита-лифтер имела следующие параметры:  $R_g = 5,15$  м шаг укладки низких лифтеров 1,016 м. После 2000 ч наработки длина естественной волны износа составила  $0,89 \div 0,91$  м, что несколько отличается от заданной волны, т.е. 1,016 м. Для этой мельницы наблюдалась и меньшая долговечность элементов резиновой футеровки по сравнению с футеровкой «Полимет»: 2100 ч против 3800 ч.

Пример 2. Определим длину естественной волны износа для шаровой мельницы МШЦ 3,6×4,0, работающей на ОАО «Олкон» при дезинтеграции железных руд и использующей резиновую футеровку плита-плита «Полимет» со следующими параметрами:  $R_g = 1,675$  м, шаг укладки плит 465 м,  $k = 1,21$ . В этом случае  $l_\phi = 0,430$  м.

Длина естественной волны износа, наблюдаемая в мельнице после 11200 ч наработки колебалась в пределах 0,430-0,470 м. Совпадение, как видно, вполне удовлетворительное; наработка резиновой футеровки до отказа составила 13700 ч.

Для сравнения: на аналогичной мельнице МШЦ 3,6×4,0 в одинаковых условиях эксплуатации была установлена резиновая футеровка плита-лифтер производства Курского завода РТИ со следующими параметрами:  $R_g = 1,735$  м, шаг укладки лифтеров 0,353,  $k = 1,18$ . В этом случае длина расчетной волны износа  $l_\phi = 0,435$  м не совпадала с шагом укладки лифтеров; долговечность лифтеров не превышала 5800 ч, длина естественной волны как и в предыдущем примере находилась в пределах 0,430-0,460 м.

Пример 3. Определим длину естественной волны износа для мельницы МШЦ 3,2×4,5, работающей на СП «Эрдэнэт» при дезинтеграции полиметаллических руд и использующей резиновую футеровку плита-плита со следующими параметрами  $R_g = 1,45$  м, шаг укладки плит 0,465 м,  $k = 1,20$ . Тогда  $l_\phi = 0,370$  м.

Экспериментально наблюдаемая в мельнице после 17500 ч наработки длина естественной волны износа была равна 0,380-0,410 м; долговечность плит до отказа колебалась в пределах  $(18-20) \cdot 10^3$  ч. Для сравнения: металлическая футеровка на мельнице МШЦ 3,2×4,5 в аналогичных условиях эксплуатации имела наработку 8300-9000 ч.

Пример 4. Определим длину естественной волны износа для мельницы МШЦ 5,5×6,5 м (СП «Эрдэнэт») при следующих параметрах:  $R_g = 2,59$  м, шаг укладки плит 0,465 м,  $k = 1,1$ . В этом случае  $l_\phi = 0,610$ ; наблюдаемая экспериментально длина естественной волны износа равна 0,570-0,590 м.

Для наглядности все рассматриваемые примеры сведены в табл. 1. Следует отметить, что весьма трудно сравнивать длину естественной волны износа для футеровок различной конструкции в силу различного гидродинамического движения пульпы на разделе фаз пульпа-футеровка. Вместе с тем, и это подтверждается практикой, коэффициент корреляции больше зависит от диаметра мельницы, являясь его линейной функцией, и от коэффициента скольжения загрузки относительно футеровки.

Таблица 1

Конструкция резиновой футеровки	Конструкция мельницы	Шаг укладки, м	Колич. рядов укладки	Расчетная длина волны износа, м	Естеств. длина волны износа, $\ell_{\phi}$ , м	$R_g$ , м	$k$	Долговечность до отказа по критериям «Полимет», ч
Плита-лифтер «Полимет»	ММС 105×54 Сызраньский завод АК «АЛРОСА»	0,916	72	0,860	0,850-0,920	5,10	0,8	3800
Плита-лифтер «Сведала»	ММС 105×54 «Сведала» АК «АЛРОСА»	1,016	64	0,850	0,890-0,910	5,15	0,8	2100
Плита-плита $H_{\max} = 160$ мм «Полимет»	МШЦ 5,5×6,5 «Эрдэнэт»	0,465	36	0,610	0,570-0,590	2,59	1,10	1806
Плита-плита завод РТИ г. Курск	МШЦ 3,6×4,0 «Олкон»	0,353	32	0,435	0,430-0,460	1,735	1,18	5800
Плита-плита «Полимет»	МШЦ 3,6×4,0 «Олкон»	0,465	24	0,430	0,430-0,470	1,675	1,21	$(13-14) \cdot 10^3$
Плита-плита «Полимет»	МШЦ 3,2×4,5 «Эрдэнэт»	0,465	21	0,370	0,380-0,410	1,45	1,2	$(18-20) \cdot 10^3$

#### 4 Универсальный индекс качества мельниц с резиновой футеровкой

В связи со значительными достижениями, особенно в последние годы, в области разработки принципов конструирования и расчета футеровок, механики и химии резины перспективы их применения, по крайней мере на ближайшие двадцать лет, не вызывают сомнения. Сегодня на мировом рынке конкурируют десятки предприятий-производителей, изготавливающих резиновые футеровки. При этом сами футеровки отличаются не только геометрическими размерами, формой и типом резины; они отличаются, прежде всего, долговечностью – одним из важнейших показателей, который наряду со стоимостью, собственно говоря, и определяет рыночную ценность футеровки. Предприятиям-потребителям порой трудно дать предпочтение той или иной конструкции футеровки, т.к. ее качество определяется многими, нередко противоречащими друг другу, показателями.

Существует много критериев для оценки эксплуатационных качеств футеровок мельниц: время наработки до отказа (в часах или в тоннах переработанного сырья); потеря веса или высоты резиновых элементов (за час работы, на единицу затраченной энергии или на тонну переработанного сырья); трудозатраты для установки футеровки; потерянное производство во время простоя оборудования (в современной рыночной ситуации снижение простоя мельницы даже на 5-10 % может экономически превзойти сумму годовых затрат на замену футеровки) и т.д.

Как видно, для определения качества футеровки нужен универсальный показатель мельницы с резиновой футеровкой типа индекса качества, который интегрально характеризовал бы всю систему с общих ценностных позиций. Безусловно, такой показатель должен включать в себя основные критерии оценки работы мельницы. На взгляд авторов эти критерии следующие.

1. Удельная производительность мельницы по классу -0,071 мм,  $P$ , т/(ч·м<sup>3</sup>);
2. Удельный расход электроэнергии,  $N$ , кВт/т;
3. Удельный расход мелющих тел,  $q$ , кг/т;
4. Прирост класса готового продукта,  $\eta$ , %;
5. Время работы резиновой футеровки до отказа,  $t^*$ , ч;
6. Количество переработанной руды,  $Q$ , тыс. т;
7. Суммарная стоимость резиновой футеровки, металлической арматуры и элементов крепления,  $\Sigma C_{\phi}$ ;
8. Суммарная стоимость монтажных работ,  $\Sigma C_m$ ;
9. Суммарная стоимость монтажно-демонтажных работ при замене разрушенных элементов футеровки (плит, лифтеров и т.д.),  $\Sigma C_{\delta}$ ;

Здесь уместны следующие замечания:

- показатель  $Q$  (количество переработанной руды в целом за время работы футеровки) выбран вместо удельной часовой производительности мельницы или секции в целом по следующей причине – мельница может работать с различной загрузкой – 30 %, 40 % и т.д., поэтому показатель  $Q$  более объективен;
- в практике существует показатель, характеризующий удельный расход резиновой футеровки (кг/т) на тонну перерабатываемого продукта; однако более объективным является интегральная оценка работоспособности футеровки – время  $t^*$  до отказа; здесь следует подчеркнуть, что параметр  $t^*$  также является несколько субъективным, т.к. футеровки различных фирм и, следовательно, различных конструкций имеют различные критерии отказа.

Таким образом, выражение для индекса качества мельниц одного типа с различными конструкциями резиновых футеровок можно представить как соотношение основных показателей мельницы ( $M$ ) с новой футеровкой к аналогичным показателям мельницы ( $M_b$ ) с базовой футеровкой, т.е.:

$$I_k = \frac{M}{M_b} = 10 \left( \frac{P}{P_b} \cdot \frac{N}{N_b} \cdot \frac{q}{q_b} \cdot \frac{\eta}{\eta_b} \cdot \frac{t^*}{t_b^*} \cdot \frac{Q}{Q_b} \cdot \frac{\sum C_{\phi}}{\sum C_{\phi b}} \cdot \frac{\sum C_m}{\sum C_{m b}} \cdot \frac{\sum C_{\delta}}{\sum C_{\delta b}} \right). \quad (3)$$

Здесь коэффициент 10 взят для удобства использования индекса качества в инженерной практике.

В качестве примера рассмотрим определение индекса качества для двух шаровых мельниц типа МШЦ 3,6×4 второй стадии измельчения железных руд в условиях предприятия «Олкон». Условия эксплуатации мельниц, т.е. качество исходного продукта, коэффициент заполнения барабана, диаметр шаров и т.д. были идентичны. В первой мельнице, принятой за базовую, использовалась традиционная резиновая футеровка «плита-лифтер» Курского завода РТИ; во второй мельнице – футеровка типа «плита-плита» с высотой плиты 160 мм, укладка плит типа «бегущая волна».

Если принять основные показатели базовой мельницы за единицу, то аналогичные показатели второй мельницы были следующими: удельная производительность по классу – 0,071 мм увеличилась на 3,1 %; удельный расход электроэнергии снизился на 6 %; удельный расход мелющих тел снизился на 6 %; прирост класса – 0,071 мм в среднем повысился на 3,1 %; максимальное время работы резиновой футеровки составило 28 месяцев; количество переработанной руды за время исследований для обеих мельниц было примерно одинаковым; стоимость резиновой футеровки «плита-плита» и стоимость ее первичных монтажных работ были примерно равны стоимости футеровки «плита-лифтер» и первичных монтажных работ; стоимость новых лифтеров и некоторых разрушенных плит и стоимость монтажно-демонтажных работ по их замене в два раза превышает стоимость первичных монтажных работ футеровки «плита-плита». При этом следует отметить, что максимальная долговечность футеровки «плита-лифтер» была 8 месяцев, а футеровки «плита-плита» колебалась в диапазоне 18-28 месяцев. Для расчета взяты максимальные значения долговечности футеровок.

Все эти показатели в относительных единицах сведены в табл. 2. При подстановке данных в уравнение (3) получим следующие результаты: базовая мельница с резиновой футеровкой «плита-лифтер» имеет индекс качества  $I_k = 10$ ; мельница с футеровкой «плита-плита» имеет индекс качества  $I_k = 83,6$ . Основной вклад, как это следует из таблицы, внесли следующие показатели: время наработки резиновой футеровки до отказа и суммарная стоимость монтажно-демонтажных работ по замене разрушенных лифтеров и плит.

Таблица 2 – Сравнительные характеристики мельниц с различной футеровкой

Основные показатели мельниц типа МШЦ 3,6×4,0	Резиновая футеровка типа «плита-лифтер»	Резиновая футеровка типа «плита-плита»
Удельная производительность мельницы по классу – 0,071 мм, $P$ , т/(ч·м <sup>3</sup> )	1,0	1,031
Удельный расход электроэнергии, $N$ , кВт/т	1,0	1,06
Удельный расход мелющих тел, $q$ , кг/т	1,0	1,06
Прирост класса – 0,071 мм, $\eta$ , %	1,0	1,031
Время работы резиновой футеровки до отказа, $t$ , ч	1,0	3,50
Количество переработанной руды, $Q$ , тыс. т	1,0	1,0
Суммарная стоимость резиновой футеровки и металлической арматуры, $\Sigma C_{\phi}$	1,0	1,0
Суммарная стоимость монтажных работ, $\Sigma C_m$	1,0	1,0
Суммарная стоимость монтажно-демонтажных работ при замене разрушенных элементов футеровки, $\Sigma C_{\partial}$	1,0	2,0

Практика подтверждает объективность такой интегральной оценки эксплуатации мельниц с резиновой футеровкой; результаты многих исследований свидетельствуют о том, что индекс качества в принятом варианте может быть использован предприятиями-потребителями при выборе приемлемой для данных условий конструкции резиновой футеровки.

Предлагаемый индекс качества для оценки резиновых футеровок обладает достаточной универсальностью, чтобы при появлении на рынке новых конструкций учитывать их положительные свойства.

Так, например, в последнее время появились новые прогрессивные футеровки типа «плита – плита» и «плита – лифтер» («непрерывная волна» с металлическими вставками-шипами конструкции ООО «ВАЛСА-ГТВ»); такие футеровки (по сути резино-металлические) позволяют устойчиво работать с шарами диаметром 100 мм. Предварительные данные расчета индекса качества показывают его существенное увеличение по сравнению с базовым вариантом ( $I_M > 120$ ).

## Выводы

Для создания резиновых защитных футеровок барабанных рудоизмельчительных мельниц с высоким индексом качества элементы футеровки должны удовлетворять условиям триады: «технологическая пригодность – высокая долговечность и надежность – низкая стоимость».

Принимая во внимание имеющуюся научную и экспериментальную информацию в области теоретических и проектных исследований, используя многолетний промышленный опыт эксплуатации барабанных мельниц различного технологического назначения, по мнению авторов, приоритетными направлениями для решения этой проблемы являются:

- разработка оптимальных конструкций элементов резиновой футеровки и способов оптимального размещения их в барабане мельницы;
- разработка оптимальной рецептуры резиновой смеси и технологии изготовления элементов резиновой футеровки;

- разработка и заключение между заинтересованными предприятиями соглашений, обеспечивающих:
  - координацию деятельности предприятий по проектированию и изготовлению барабанных мельниц и резиновой футеровки и предприятий-пользователей;
  - унификацию подходов, методов и процедур оценки качества барабанных мельниц с резиновой футеровкой и непосредственно резиновых футеровок;
  - унификацию элементов резиновых футеровок для существующих и вновь создаваемых барабанных мельниц;
- проблема создания резиновой футеровки является частью общей проблемы динамики барабанных мельниц; важным при этом является выяснение физических особенностей процесса взаимодействия футеровок с перерабатываемой средой;
- будущее в области создания и использования резиновых футеровок зависит от прогресса фундаментальных наук, а не повседневных незначительных усовершенствований; при этом весьма важен тройственный союз: исследователей и конструкторов, технологов резины и технологов измельчительного оборудования; именно при тесном сотрудничестве между наукой и технологиями за последнее время были получены весьма важные достижения в области создания футеровок: разработаны новые резины, новые конструкции футеровок, новые технологии их изготовления. Примером этому может служить создание новых энергосберегающих футеровок типа «плита – лифтер» и «плита – лифтер – плита» с металлическими вставками-шипами или без них (укладка в барабане мельницы по специально разработанной на базе фундаментальных расчетов методике, так называемая «непрерывная волна») конструкции ООО «ВАЛСА-ГТВ» (г. Белая Церковь).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булат А.Ф., Дырда В.И., Звягильский А.Е., Маркелов А.Е. Прочность и разрушение резиновых деталей технологических машин. – Киев: Наукова думка, 2010. – 440 с.
2. Дырда В.И., Маркелов А.Е. Резиновые детали технологических машин. – Москва-Днепропетровск, 2008. – 316 с.
3. Дырда В.И. Прочность и разрушение эластомерных конструкций в экстремальных условиях. – Киев: Наукова думка, 1988. – 232 с.
4. Чижик Е.Ф., Маркелов А.Е., Дырда В.И. Защитные футеровки барабанных рудоизмельчительных мельниц. – Днепропетровск, 2002. – 204 с.