

Дырда В.И., д-р техн. наук, профессор
(ИГТМ НАН Украины),
Калашников В.А., директор
(ООО «Валса-ГТВ»),
Хмель И.В., гл. обогатитель
(СевГОК)

НОВАЯ РЕСУРСО- И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ RES-ТЕХНОЛОГИЯ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ РУД В ШАРОВЫХ МЕЛЬНИЦАХ С РЕЗИНОВОЙ ФУТЕРОВКОЙ

Аннотация. Рассматриваются основные тенденции развития конструкций рудоизмельчительных мельниц: увеличение диаметра барабана, снижение частоты вращения, повышение долговечности и надёжности всех узлов и деталей барабанных мельниц. Показана особая роль резиновой футеровки в мельницах. Излагается закономерность волнового износа резиновой футеровки при её взаимодействии с внутримельничной загрузкой. Рассматриваются основные составляющие новой ресурсо- и энергосберегающей технологии измельчения руд в шаровых мельницах.

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

V.I. Dyrda, D. Sc. (Tech.), Professor
(IGTM NAS of Ukraine),
V.A. Kalashnikov, Director
(Valsa-GTV Ltd.),
I.V. Khmel, Chief Enricher
(Northern Mining and Processing Plant)

NEW RESOURCE- AND ENERGY-SAVING TECHNOLOGY OF ORE DESINTEGRATION IN BALL MILLS WITH RUBBER LINING

Abstract. The main tendencies of development of designs of ore-grinding mills such as increasing the diameter of the drum, reducing speed, increasing the durability and reliability of all components and parts of tumbling mills are considered. The special role of the rubber lining in the mills is presented. A consistent pattern of rubber lining wave wear during its interaction with inner mill loading is described. The basic components of the new resource- and energy-saving technology of ore grinding in ball mills are considered.

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

Введение

Находящаяся в самом центре Европы Украина обладает большими запасами минерального сырья, особенно железных и марганцевых руд, развитой горно-металлургической инфраструктурой и мощным кадровым потенциалом.

В горно-металлургической промышленности для измельчения полезных ископаемых наибольшее распространение получили барабанные мельницы: шаровые, стержневые и бесшарового измельчения, так называемые мельницы самоизмельчения или полусамоизмельчения (с небольшой добавкой шаров). Конструкции таких барабанных мельниц, механика дробящей среды, технология измельчения различного сырья на обогатительных фабриках, способы защиты барабанов мельниц от разрушения и другие важные вопросы, касающиеся процессов измельчения полезных ископаемых, достаточно подробно изложены в известной литературе [1-52]. Поэтому ниже будут рассмотрены те из них, которые имеют непосредственное отношение к теме настоящих исследований, т.е. к применению

резиновых футеровок в барабанных мельницах. Резиновая футеровка в практике горно-металлургических предприятий (помимо таких известных устройств как течки, рудоспуски, пульпопроводы, рабочие части насосов, скипы, и т.д., где используются резиновые футеровки для защиты от износа и коррозии) наибольшее распространение получила в шаровых мельницах мокрого измельчения и мельницах мокрого самоизмельчения.

Работы последних лет в рассматриваемой области [1-52] с достаточной очевидностью свидетельствуют о важности исследований процессов измельчения материалов в барабанных рудоразмольных мельницах и роли защитных футеровок в этих процессах.

Авторы разделяют точку зрения многих отечественных и зарубежных специалистов на перспективу развития способов рудоподготовки в ближайшем (примерно на 20 лет) обозримом будущем – основным способом останется измельчение в барабанных мельницах. За последние десятилетия чётко наметились основные тенденции развития конструкций барабанных мельниц. Если не принимать во внимание мельницы для измельчения специальных материалов, то эти тенденции сводятся к следующему:

- преимущественному использованию резиновой футеровки как одного из важнейших факторов повышения эффективности и качества работы барабанных мельниц;
- увеличению диаметра барабана и уменьшению его длины; уже сейчас в эксплуатации находятся мельницы мокрого самоизмельчения диаметром 10,5 м и 11,0 м, в перспективе увеличение диаметра до 14,0 м и более;
- снижению частоты вращения барабана; современные мельницы типа ММС 105×54 имеют частоту вращения (7,70÷11,60) об./мин; при увеличении диаметра барабана частота вращения будет уменьшаться;
- оптимальному подбору геометрической конфигурации и материала мелющих тел: рассматривается вопрос широкого использования, помимо шаров, мелющих тел в виде цилиндров и параболоидов, выполненных из специальных материалов;
- оптимальному заполнению барабана мельниц, обеспечивающих наибольшую производительность при максимальном выходе конечного продукта.

Всё это вместе призвано улучшить эффективность и качество существующих барабанных мельниц и способствовать созданию более перспективных их конструкций. С этой целью длительная практика выработала ряд направлений, среди которых следует отметить:

- необходимость снижения удельного расхода электроэнергии и удельного расхода шаров; в качестве примера важности этого направления можно привести следующие данные: на восьми ГОКах Украины только на измельчение в шаровых мельницах расходовалось в год (данные 1989 года) около 4,0 млрд.кВт·ч электроэнергии и примерно 300 тыс. т мелющих тел; в затратах на измельчение стоимость электроэнергии и мелющих тел составляет более 70 %;
- необходимость повышения долговечности и надёжности всех узлов и деталей барабанных мельниц: привода, барабана, защитных футеровок и вспомогательного оборудования; в современных конструкциях нередко долговечность одной

детали, например футеровки, определяет стабильность работы мельницы и её межремонтный пробег;

- необходимость повышения технологических показателей мельниц, в первую очередь производительности и качества конечного продукта; в этом вопросе важную роль играет резиновая футеровка, её геометрические параметры, профиль рабочей поверхности и способ укладки элементов в барабане;
- необходимость разработки оптимизационных моделей работы мельниц, учитывающих многовекторность технологических процессов (прежде всего стохастичность процесса измельчения) и взаимодействие многих факторов: геометрических размеров барабана, динамический режим его движения, технологические характеристики измельчаемой среды и т.д., при этом следует учитывать, что совокупность действия многих факторов не является простым суммированием отдельных факторов (так называемый принцип эмерджентности, т.е. свойства целого не сводятся к сумме свойств отдельных его частей).

Со временем развитие конструкций барабанных мельниц и усовершенствование технологии измельчения, безусловно, поставят перед конструкторами и пользователями новые задачи. Однако изложенные выше тенденции и направления в ближайшие двадцать лет, по-видимому, изменятся весьма незначительно.

Закономерность волнового износа резиновой футеровки

Ранее отмечалось [3], что 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.

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).

Изложенное, а также результаты длительных лабораторных и промышленных исследований позволяют сделать некоторые важные выводы.

- 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 Рэля-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.

- 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 непродолжительного времени и минимальный износ элементов футеровки.

Новая ресурсо- и энергосберегающая технология

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

Однако в энергозатратных технологиях, особенно в технологиях горного производства, несмотря на усилия многих исследователей и технологов изменения происходят крайне медленно. Вызвано это, прежде всего, огромными объёмами перерабатываемого материала и спецификой самого горного производства: по мнению В. Вернадского в двадцатом веке деятельность человека по добыче и переработке минерального сырья стала соизмерима с деятельностью геологических процессов на Земле. Связано также и с тем фактом, что в большинстве случаев дезинтеграции минерального сырья используются традиционные технологии, которые за последние сто лет в смысле энергосбережения изменились несущественно.

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

В настоящей статье нет необходимости развивать эту популярную тему, достаточно лишь подчеркнуть, что в горной промышленности Украины обогатительному переделу подвергается свыше 100 млн. т железной руды в год; при этом на дезинтеграцию руд как наиболее трудоёмкий процесс приходится 50-70 % энергозатрат, капитальных и эксплуатационных расходов. Поэтому в новом тысячелетии обогатительные фабрики прилагают большие усилия для минимизации капиталь-

ных вложений и эксплуатационных затрат на тонну перерабатываемой руды. С этой целью во всей производственной цепочке используют современные достижения механики и технологии.

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

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

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

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

Уже в начале XXI века компания «Metso Minerals» установила в Австралии мельницу полусамоизмельчения диаметром барабана 12,2 м и длиной 6,71 м; шаровые мельницы этой компании с центральной разгрузкой диаметром 7,62 м и длиной 12,2 м установлены в Чили [2]. Мельницы самоизмельчения диаметром 10,5 м сегодня не редкость и успешно работают на многих предприятиях, например, мельница ММС-10,5/5,6 для дезинтеграции алмазосодержащих руд на предприятии «Алроса» [3].

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

Современные возможности расчёта, конструирования и изготовления барабанных рудоизмельчительных мельниц (в том числе такие новые технологии как:

методы и обработки крупногабаритных изделий, новые марки сталей и сплавов, новые методы контроля качества изготавливаемых деталей и т.д.) позволяют создавать мельницы больших диаметров и в основном удовлетворять требованиям современных технологий.

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

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

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

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

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

В последние годы резинометаллическую футеровку стали использовать и на мельницах первой стадии измельчения. Так, например, на СевГОКе (г. Кривой Рог, Украина) при измельчении крепких железных руд на шаровой мельнице диаметром 3,6 м с шарами диаметром 100 мм резинометаллическая футеровка «G.M-волна» (изготовитель ООО «ВАЛСА-ГТВ») показала хорошие результаты как по технологическим показателям, долговечности и надёжности (отсутствие внезапности отказа), так и по низким эксплуатационным затратам монтажно-

демонтажных работ: снизилось потребление электроэнергии; на 5 % снизился удельный расход мелющих тел; прирост готового класса продукта увеличился на (10-12) % [3].

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

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

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

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

- снизить массу комплекта футеровки более чем в 3-5 раз и тем самым повысить срок службы опорных подшипников, снизить эксплуатационные затраты на монтажно-демонтажные работы по замене изношенной футеровки и уменьшить риск несчастных случаев;
- в 2-3 раза снизить шум;
- на (3-5) % повысить коэффициент использования мельниц (резиновая футеровка по сравнению с металлической имеет меньшую толщину);

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

Помимо этого:

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

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

Таблица

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

**Как видно, удельный расход электроэнергии на мельницах с резиновой футеровкой «Плита – Волна» за весь период испытаний по сравнению с металлической футеровкой ниже: во второй стадии измельчения на 7,1 %, в третьей стадии измельчения на 7,46 %.

Помимо этого, применение резиновых футеровок в технологических схемах рудоподготовки позволило: снизить удельный расход мелющих тел на 10 % и снизить удельный расход электроэнергии в целом на технологическую секцию на (10-12) %.

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

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

энергопотребление и расход шаров, чем делать ставку только на стоимость футеровки.

Выводы

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

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

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

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

5. Пятилетний опыт применения ES-технологии более чем на десяти предприятиях (примерно 150 мельниц различного назначения) показал явные преимущества новых конструкций резиновых и резинометаллических футеровок по сравнению как с металлическими футеровками, так и резиновыми футеровками, например, «Плита – Лифтёр». Так, на СевГОКе на второй и третьей стадии измельчения достигнуты следующие положительные результаты: прирост готового класса увеличился на (17-29) %; расход мелющих тел снизился на 10 %; удельный расход электроэнергии в целом на технологическую секцию снизился на (10-12) %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Динамическая модель волнового абразивно-усталостного разрушения резиновой футеровки в барабанных мельницах / В.И. Дырда, В.А. Калашников, С.Л. Евенко, А.Е. Маркелов, И.В. Хмель, А. Стойко // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. – 2012. – Вып. 106. – С. 15-24.
2. Стюарт М. Джонс, Витас Свалбонас. Крупногабаритные мельницы компании Metso Minerals // Горная промышленность. – 2004. – № 6.
3. Дырда, В.И. Резиновые футеровки технологических машин / В.И. Дырда, Р.П. Зозуля. – Москва – Днепропетровск, 2013. – 236 с.
4. Модернизация технологии измельчения руд на ГОКе «Кубака» / А.П. Романов, Г.Б. Колосай, Д.В. Ермаков, А.В. Колтунов // Горная промышленность. – 2004. – № 5.
5. Развитие систем мельничных футеровок / Klas-Goran Eriksson, Gunder Marklund, А.П. Гребенешников, В.Ю. Фищев // Горная промышленность. – 2010. – № 1.

REFERENCES

1. Dyrda, V.I., Kalashnikov, V.A., Yevenko, S.L., Markelov, A.Ye., Khmel, I.V. and Stoyko, A. (2012), "Dynamic model of wave abrasive fatigue failure of the rubber lining in rattlers", *Geo-technical mechanics*, no. 106, pp. 15-24.
2. Dzhons, S.M. and Svalbonas, V. (2004), "Large mills by Metso Minerals", *Mining industry*, no. 6.
3. Dyrda, V.I. and Zozulya, R.P. (2013), *Rezinovyye futerovki tekhnologicheskikh mashin* [Rubber linings of technological machines], Dnepropetrovsk, Ukraine.
4. Romanov, A.P., Kolosay, G.B., Yermakov, D.V. and Koltunov, A.V. (2004), "Modernization of ore grinding technology at the mining processing plant "Kubaka", *Mining industry*, no. 5.

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

Об авторах

Дырда Виталий Илларионович, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом механики эластомерных конструкций горных машин, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина, vita.igtm@mail.ru

Калашников Вячеслав Алексеевич, директор ООО «ВАЛСА-ГТВ», Белая Церковь, Украина

Хмель Ирина Витальевна, главный обогатитель, СевГОК, Кривой Рог, Украина

About the authors

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

Kalashnikov Vyacheslav Alekseevich, Director, Valsa-GTV Ltd., Belaya Tserkov, Ukraine

Khmel Irina Vitalyevna, Chief Enricher, Northern Mining and Processing Plant, Krivoy Rog, Ukraine

А.И. Волошин, чл.-корр. НАН Украины, д-р техн. наук, профессор,
 Н.И. Лисица, канд. техн. наук, ст. научн. сотр.
 (ИГТМ НАН Украины),
 А.В. Толстенко, канд. техн. наук, доцент,
 В.А. Колбасин, канд. техн. наук, доцент,
 (ДГАУ)

ВЫБОР ЖЕСТКОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВИБРОИЗОЛЯТОРОВ С ВНУТРЕННЕЙ ПЕРЕМЫЧКОЙ

Аннотация. Излагается алгоритм расчёта виброизоляторов типа ВР с внутренней перемычкой, позволяющей получить нелинейную жесткостную характеристику. Рассматривается определение жесткостных параметров и диссипативного разогрева при статических и динамических нагрузках. Задача о термомеханическом поведении виброизолятора решается методом конечных элементов: используется изопараметрический четырёхугольный конечный элемент с квадратичной аппроксимацией полей перемещений и температуры.

Ключевые слова: виброизоляторы типа ВР, определение жесткостных параметров, статические и динамические нагрузки; метод конечных элементов

A.I. Voloshin, Corresponding Member NASU, D. Sc. (Tech.), Professor,
 N.I. Lisitsa, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher
 (IGTM NAS of Ukraine),
 Yu.G. Kozub, Ph. D. (Tech.), Associate Professor
 (LNU),
 A.V. Tolstenko, Ph. D. (Tech.), Associate Professor,
 V.A. Kolbasin, Ph. D. (Tech.), Associate Professor
 (DSAU)

SELECTING RIGIDITY PARAMETERS OF VIBRATION ISOLATORS WITH AN INTERNAL JUMPER

Abstract. We present calculation algorithm for type VR vibration isolators with internal jumpers to get the nonlinear stiffness characteristics. Determination of the stiffness parameters and dissipative heating under static and dynamic loads is considered. The problem of the thermomechanical behavior of vibration isolator is solved by finite element method: we use isoparametric quadrilateral finite element with quadratic approximation of the displacement fields and temperature.

Keywords: type VR vibration isolators, stiffness parameters determination, static and dynamic loads, finite elements method

Введение

В современном машиностроении для защиты машин, зданий и сооружений от вибраций и шума широко используют резиновые виброизоляторы самой различной геометрической формы. Для одномассных резонансных вибромашин особый интерес представляют виброизоляторы типа ВР со сложной формой свободной поверхности. В известной литературе [1-5] рассматривались некоторые проблемы расчёта таких виброизоляторов.

В настоящей статье приводится алгоритм расчёта виброизоляторов со специальной перемычкой, позволяющей реализовать нелинейную жесткостную характеристику.