

УДК 621.926.5

**В. П. Бондаренко<sup>1</sup>**, член-кор. НАН Украины, **А. В. Галков<sup>1</sup>**,  
**Л. С. Сидоренко<sup>2</sup>**, **Л. Е. Василенко<sup>1</sup>**, **С. Ф. Ковязин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев

<sup>2</sup>ГНПП «АЛКОН-ТВЕРДОСПЛАВ» НТАК «АЛКОН» НАН Украины, г. Киев

### **АЛЬТЕРНАТИВА ТРАДИЦИОННОЙ ФУТЕРОВКЕ БАРАБАНЫХ МЕЛЬНИЦ**

*Предложена стальная защитная конструкция типа «беличья клетка» в качестве альтернативы традиционной «сплошной» футеровке внутренней поверхности барабанной мельницы. Конструкция внедрена в условиях мелкосерийного твердосплавного производства при модернизации барабанных мельниц среднего размера.*

**Ключевые слова:** футеровка, барабан, мельница, твердый сплав.

Барабанные мельницы широко применяют для измельчения (как грубого, так и тонкого) различных материалов во многих отраслях производства. Важным компонентом таких мельниц является футеровка, защищающая внутреннюю поверхность барабана от изнашивания и размалываемую смесь от намола железа, что имеет особое значение в твердосплавном производстве. Элементы футеровки прикрепляются к внутренней поверхности барабана либо с помощью клеящих средств, либо (в большинстве случаев) с помощью различных систем крепежа, связанных с необходимостью высверливания в барабане многочисленных отверстий. Последнее требует высокой точности исполнения, нарушает целостность барабана, создает проблемы при попытке замены типоразмера футеровки.

В процессе эксплуатации барабанных мельниц периодически возникает потребность в замене изношенной или поврежденной футеровки. Практика показывает, что это является основной причиной простоев оборудования. Чем сложнее футеровка и дороже ее элементы, тем более трудоемки, длительны и дорогостоящи ее ремонт или полная замена. Таким образом, актуальной задачей является поиск альтернатив традиционной футеровке и разработка такой защитной конструкции размольного барабана, которая позволит значительно увеличить межремонтный период и упростить технологию ее монтажа и разборки.

Традиционно применяются следующие основные виды мельничных футеровок, покрывающих сплошным слоем внутреннюю поверхность размольного барабана: металлическая (наиболее универсальная и широко применяемая); резиновая (как правило, применяется в конструкции «лифтер/плита»); комбинированная из различных материалов (обычно износостойкой стали и упругой резины, которая гасит ударные нагрузки). Выбор конкретной системы мельничной футеровки определяется многими факторами, в том числе физико-механическими свойствами и размерами измельчаемого материала, требуемой степенью и производительностью измельчения, условиями эксплуатации и техобслуживания, формой и размерами барабана и др.

На Государственном научно-производственном предприятии (ГНПП) «АЛКОН-ТВЕРДОСПЛАВ», созданном на производственной базе Института сверхтвердых материалов (ИСМ) им. В. Н. Бакуля НАН Украины, с мелкосерийным типом производства рациональным является применение барабанных вращающихся однокамерных шаровых мельниц периодического действия средних размеров. Такие мельницы с барабаном, имеющим форму короткого цилиндра емкостью 50 л (диаметром и длиной порядка 0,5 м), используются для мокрого размола и смешивания порошковых компонентов твердосплавных смесей типа ВК и ТК, а также дробления и размола хрупких брикетов регенерированных твердых сплавов, образующихся при восстановлении-карбидизации окисленных порошков, получаемых из лома и отходов исходных твердых сплавов.

В качестве футеровки первоначально использовали пластины твердого сплава марки ВК8, которые крепили к внутренней цилиндрической поверхности барабана и торцевым крышкам эпоксидным клеем. В процессе эксплуатации под влиянием ударов размалывающих тел (шаров из сплава ВК8 диаметром 5–10 мм) происходили неконтролируемые поломки, выкрашивание и отслаивание футеровочных пластин, что приводило к нарастающему загрязнению твердосплавных смесей, вследствие чего возрастала пористость и снижались физико-механические свойства спеченных твердосплавных изделий вплоть до недопустимых значений, что требовало безусловной остановки оборудования на длительный период для ремонта (замены футеровки).

В целях поиска нетрадиционного пути решения создавшейся проблемы были проанализированы литературные источники и проведены собственные практические изыскания на предмет выявления основных факторов, влияющих как на интенсивность размола, так и на скорость изнашивания футеровки. Особый интерес представили результаты обширных исследований мокрого размола твердосплавных смесей, проведенных во ВНИИТС [1]. Для тонкого измельчения частиц твердосплавных смесей малоэффективным является дробление падающими шарами («водопадный» режим), к тому же повышается вероятность поломки футеровочных пластин под воздействием сильных ударов шаров. Дисперсность и однородность смеси гораздо эффективнее достигается не ударным, а истирающим действием шаров («каскадный» режим), которое может реализовываться в двух вариантах: скольжением и перекачиванием шаров.

В режиме скольжения вся масса шаров совершает колебательные движения, то поднимаясь вместе со стенкой вращающегося барабана, то соскальзывая, когда момент силы тяжести превышает момент силы трения. При этом измельчается только материал, находящийся между стенкой барабана и массой шаров, что вызывает повышенный износ внутренней поверхности барабана. Наиболее благоприятен режим перекачивания, при котором шары, поднимаясь со стенкой барабана, затем скатываются по свободной поверхности массы шаров, наклон которой равен углу естественного откоса, а скольжение полностью отсутствует. В этом случае измельчается материал, попадающий в промежуток между шарами вследствие трения шаров друг о друга, а зона встречи скатывающихся шаров со стенкой барабана и износ стенки минимальны.

Следует отметить, что определить оптимальные значения общей загрузки и скорости вращения барабана довольно трудно. Так, только для расчета критической относительной загрузки шаров, соответствующей переходу от режима скольжения (при загрузке ниже критической) к режиму перекачивания (при загрузке выше критической), необходимо предварительно найти коэффициент трения шаров о стенку барабана и угол естественного откоса шаров, которые изменяются не только в зависимости от свойств шаров и стенки, но и твердосплавной смеси и размольной жидкости (обычно этилового спирта), а также от стадии размола (поскольку свойства смеси изменяются со временем).

На основе экспериментального подхода, учитывающего отмеченные особенности процесса размола, в ИСМ НАН Украины совместно с ГНПП «АЛКОН-ТВЕРДОСПЛАВ» была разработана, изготовлена и испытана стальная защитная конструкция типа «беличья клетка» (название обусловлено внешней схожестью конструкций), исключающая возможность установления режима скольжения при любой загрузке и защищающая внутреннюю поверхность барабана от повышенного изнашивания. Такой комбинированный эффект обеспечивает система продольных ребер, которые, как показала практика, могут выполнять не только обычную функцию лифтеров, поднимая шары на большую высоту, но и защитную функцию, заменяя сплошную футеровку.

Схематическое изображение модернизированного размольного барабана показано на рис. 1а. На внутренней цилиндрической поверхности корпуса барабана 1 параллельно его оси расположены продольные ребра 2 на одинаковом угловом расстоянии друг от друга. В отличие от общепринятого жесткого крепления непосредственно к корпусу (преимущественно с помощью болтовых соединений) ребра вставляются концами в пазы колец 3, установленных в выточки в торцах корпуса. Продольному смещению ребер препятствуют уступы 4, а осевому проворачиванию колец – штифты 5. Между кольцами 3 и торцевыми крышками 6 установлены стальные диски 7 и резиновые прокладки 8, обеспечивающие герметизацию барабана и отсутствие утечки пульпы.

Ребра 2 и диски 7 изготавливали из износостойкой высокомарганцевистой стали 65Г. Поскольку существует опасность выкрашивания вследствие ударного воздействия размольных шаров (особенно в момент их загрузки в пустой барабан через люк в боковой цилиндрической поверхности корпуса и в моменты их столкновения с набегающими ребрами при вращении барабана), использовали более вязкую незакаленную сталь 65Г твердостью 275 НВ. С этой же целью на ребрах, имеющих в поперечном сечении прямоугольный профиль, делали фаски или закругления. Расположенные у торцов корпуса кольца 3, где перекачиванию шаров благоприятствуют дополнительные силы трения о торцевые поверхности, изготавливали из закаленной стали 45 твердостью 45 HRC. Изготовленные детали подгоняли по месту с учетом отклонений формы и неровностей стального корпуса барабана. Сборку производили на обычном монтажном столе с помощью стандартных подъемных механизмов (рис. 1б).

Очевидным достоинством такой защитной конструкции является простота образующих ее деталей, которые могут быть изготовлены и собраны непосредственно на малом предприятии, изготавлиющем твердосплавную продукцию, при наличии участка мехобработки. Общий вид модернизированного

оборудования, изготовленного ГНПП «АЛКОН-ТВЕРДОСПЛАВ» в соответствии с разработанными чертежами и техдокументацией, показан на рис. 1, в.

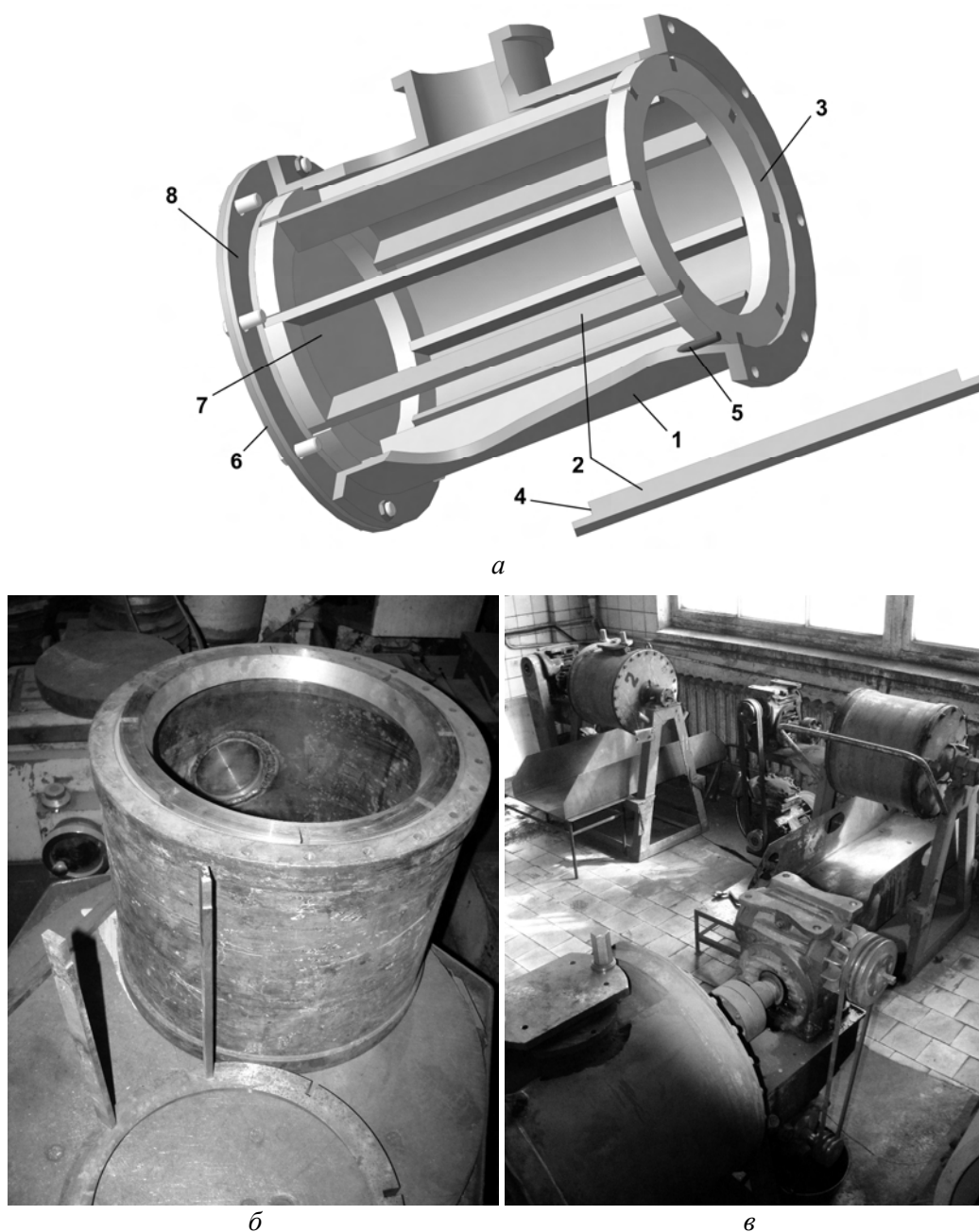


Рис. 1. Модернизированные барабанные мельницы с защитной ребристой конструкцией типа «белчья клетка»: а – схематическое изображение размольного барабана; б – общий вид сборки барабана на монтажном столе; в – общий вид модернизированных мельниц в отделении размола ГНПП «АЛКОН-ТВЕРДОСПЛАВ»

Выбор геометрических размеров деталей предложенной защитной конструкции обусловлен многими технико-экономическими факторами, но, прежде всего необходимостью обеспечить эффективную и долговечную работу ребер. Определяющим является правильный выбор шага крепления ребер в окружном направлении и соотношения линейных размеров ребер. От шага и высоты ребер зависит характер перемещения шаров, смеси и жидкости в зоне их контакта с внутренней поверхностью барабана. Разделяя цельный массив шаров и измельчаемого материала на отдельные участки, ребра обеспечивают их подъем вместе со стенкой вращающегося барабана без проскальзывания и тем самым препятствуют интенсивному истиранию внутренней поверхности барабана, устраняют переток пульпы по барабану, обеспечивая долговечность мельницы в целом. При этом нет необходимости в точной

регулировке таких параметров, как объем шаровой загрузки, частота вращения барабана, степень наполнения барабана другими компонентами. От соотношения толщины и длины ребра зависят его прочность и жесткость. При этом очень важно максимально ограничить упругий прогиб ребра в целях предотвращения расшатывания его соединений с кольцами и минимизации колебаний ребра под действием подвижной нагрузки. От толщины ребра зависит как запас его прочности, так и с учетом неизбежного изнашивания срок его службы, а значит, межремонтный период барабана. Недостаточная толщина ребра может привести к его преждевременному разрушению, а избыточная неоправданно увеличивает материалоемкость конструкции.

Теоретически рассчитать оптимальные размеры ребер не представляется возможным ввиду сложности и недостаточной изученности процесса размола. Поэтому при проектировании модернизированного размольного барабана исходили из упрощающих допущений и основанных на них оценок, расчетов и экспериментов, действуя методом проб и ошибок. Трудность заключалась еще и в том, что эффективность выбранных параметров можно оценить только в результате длительных натурных испытаний.

Производственные испытания модернизированных барабанов с защитной стальной конструкцией типа «белычя клетка» были проведены на ГНПП «АЛКОН-ТВЕРДОСПЛАВ» при мокром размоле смесей для вольфрамокобальтовых и вольфрамоникелевых твердых сплавов. Для размола использовали разноразмерные шары из твердого сплава ВК8 диаметром от 10 мм (начальный) до 5 мм (у изношенных шаров) при соотношении шары/смесь (по массе), обычно равном 2,5/1 или в абсолютных числах – 150 кг шаров и 60 кг смеси. Размольную органическую жидкость добавляли из расчета в среднем 0,3 л на 1 кг смеси. Продолжительность размола колебалась в пределах 1,5–3 суток, скорость (частота) вращения барабана – от 30 об/мин до  $n_{кр} = 42,4/\sqrt{D}$  ( $D$  – внутренний диаметр барабана, м).

Принципиальное значение в процессе испытаний помимо проверки работоспособности и надежности модернизированных барабанов имело выяснение степени загрязнения твердосплавных смесей железом в результате истирания шарами и частицами карбидов стальных деталей защитной конструкции и стенок барабана, а также степени однородности получаемых смесей. С этой целью определили элементный состав смесей, размолотых в модернизированных мельницах, с использованием микрорентгеноспектрального анализа. В результате исследования было установлено, что намол железа не превышает 0,2 % (по массе), тогда как согласно ТУ 48-19-341-80 «Смеси вольфрамокобальтовые и титановольфрамокобальтовые, поставляемые на экспорт» (Россия) и СТП 19-4205-227-96 «Смеси твердосплавные для производства изделий» (ОАО «Кировградский завод твердых сплавов»,

Россия) в смесях для производства твердых сплавов групп ВК и ТК допустимое содержание массовой доли железа составляет 0,2–0,3 % (по массе) в зависимости от марки сплава. На микроснимке твердосплавной смеси (рис. 2) видно, что при размоле в модернизированном барабане получается высокая степень однородности (гомогенности) твердосплавной смеси. Таким образом, как по содержанию железа, так и по однородности получаемые смеси соответствуют стандартным.

Что касается эксплуатации и обслуживания, применение предложенной конструкции вместо «сплошной» футеровки позволяет снизить нагрузку на коренные подшипники барабана, облегчить работу привода и, как следствие, снизить затраты на электроэнергию; при этом не требуются регулярный осмотр и подтяжка крепежных болтов по сравнению

со стандартными схемами крепления футеровок непосредственно к корпусу; существенно упрощаются сборка и демонтаж конструкции и соответственно снижаются связанные с этим трудозатраты.

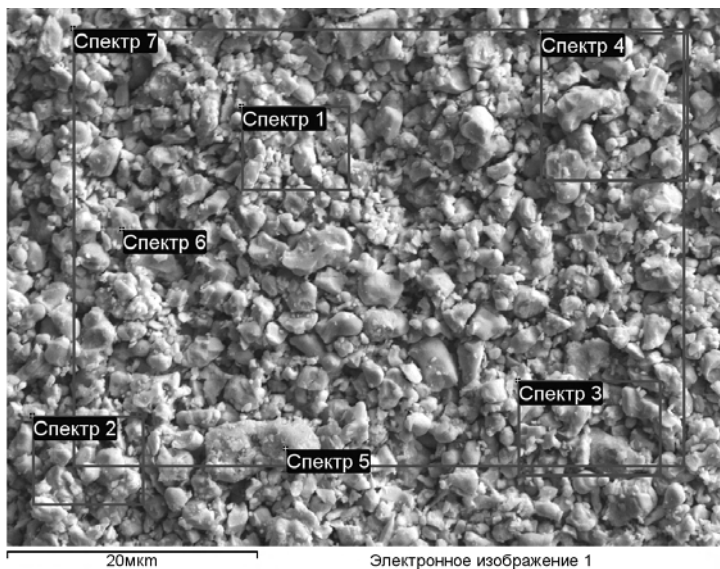


Рис. 2. Общий вид твердосплавной смеси, полученной в модернизированном барабане (отмечены области, в которых выполнялся элементный анализ)

## Выводы

В качестве альтернативы традиционной «сплошной» футеровке барабанных мельниц предложена защитная ребристая конструкция типа «беличья клетка», образуемая равномерно расположенными по окружности продольными ребрами, концы которых вставляются в пазы двух колец, закрепленных в противоположных торцах размольного барабана. Эта конструкция защищена тремя патентами Украины [2–4].

Ребра выполняют две функции, а именно: лифтеров и защитных элементов, так как не позволяют измельчаемому материалу и размольным телам свободно перемещаться в зоне контакта с внутренней поверхностью барабана и интенсивно изнашивать ее.

Предложенная защитная конструкция внедрена в производственных условиях ГНПП «АЛ-КОН-ТВЕРДОСПЛАВ» при модернизации размольных барабанов средних размеров (диаметром и длиной около 0,5 м) при мокром размоле твердосплавных смесей и хрупких брикетов регенерированных твердых сплавов. Подтверждено, что такая конструкция из стальных элементов отличается простотой монтажа, относительно небольшой массой, высокой надежностью, эффективностью и длительным сроком службы (к настоящему времени безремонтный период работы превысил пять лет).

*Запропонована стальна захисна конструкція типу «біляча клітка» як альтернатива традиційній «суцільній» футеровці внутрішньої поверхні барабанного млина. Конструкція впроваджена в умовах дрібносерійного твердосплавного виробництва при модернізації барабаних млинів середнього розміру.*

**Ключові слова:** футеровка, барабан, млин, твердий сплав.

*The protective steel construction of the "squirrel cage" type as an alternative to the traditional "solid" lining of the inner surface of the drum mill is proposed. This design is successfully implemented under the conditions of small-scale production of hardmetals during modernization of the medium-sized drum mills.*

**Key words:** lining, drum, mill, hardmetal.

## Литература

1. Третьяков В. И. Основы металловедения и технологии производства спеченных твердых сплавов. – М.: Металлургия, 1976. – 528 с.
2. Пат. на кор. мод. 28437 Україна, МПК В02С 17/22. Барабан для розмелювання порошку / Л. С. Сидоренко, В. П. Бондаренко, О. В. Галков, Л. О. Василенко та ін. – Опубл. 10.12.2007, Бюл. № 20.
3. Пат. на винахід 85321 Україна, МПК В02С 17/22. Барабан для розмелу порошку / Л. С. Сидоренко, В. П. Бондаренко, О. В. Галков, Л. О. Василенко та ін. – Опубл. 12.01.2009, Бюл. №1.
4. Пат. на кор. мод. 59430 Україна, МПК В02С 17/22. Розмельний барабан / В. П. Бондаренко, Л. С. Сидоренко, О. В. Галков, Л. О. Василенко та ін. – Опубл. 10.05.2011, Бюл. № 9.

*Поступила 24.05.11*

УДК 621.9.1.011:621.941.025

**А. А. Ласуков**, канд. техн. наук

*Юргинский технологический институт (филиал) Томского политехнического университета, РФ*

## НАПРЯЖЕНИЯ В РЕЖУЩЕЙ ЧАСТИ ИМПЛАНТИРОВАННОГО ИНСТРУМЕНТА

*Рассматривается изменение напряженно-деформированного состояния в режущем клине инструмента при обработке резанием, вызванное модификацией поверхностного слоя передней поверхности инструмента за счет ионной имплантации. Ионная имплантация, влияя на характеристики процесса резания, повышает работоспособность инструмента.*

**Ключевые слова:** режущий инструмент, имплантация, работоспособность инструмента, напряженное состояние, распределение напряжений.