



It reviews the production of cast-iron balls for milling metals.

А. Б. СТЕБЛОВ, С. Н. БЕРЕЗОВ, ООО «ЛИТОН ТЕХНОЛОГИЯ»,
А. А. КОЗЛОВ, ECF CONSALTING GMBH

УДК 669/

ЛИТЫЕ ЧУГУННЫЕ ШАРЫ ДЛЯ ПОМОЛА МАТЕРИАЛОВ

Основными потребителями мелющих шаров являются горно-металлургическая, цементная и энергетическая отрасли. Объем мирового рынка мелющих тел составляет 3 млн. т в год [1]. Согласно оценкам компании Hatch Beddows, в США и Канаде используется свыше 600 тыс. т, СНГ – 475 тыс. т (15,8%), Австралии – 370 тыс. т, Китае – 325 тыс. т.

Диаграмма потребления шаров в России (рис. 1) может быть представлена так: 43% мелющих тел для твердых и относительно бедных железных руд, 22% – медные и никелевые руды, 10% приходится на цемент.

В соответствии с Программой развития промышленности России и документом «Стратегия развития металлургической промышленности России на период до 2020 г.» ожидается существенный рост потребления мелющих шаров.

Это связано с увеличением объемов добычи угля, руд черных и цветных металлов, развитием энергетической отрасли и ростом объемов промышленного и гражданского строительства. Например, если в 2011 г. производство цемента в России составило 55,9 млн. т, то к 2015 г. предполагается увеличение производства цемента на

35 млн. т. Следует учесть, что из-за постепенного истощения сырьевой базы для извлечения полезного компонента приходится перерабатывать сопутствующую породы все в больших объемах и измельчать руду все тщательнее (зачастую фракция полезного компонента не превышает 20 мкм).

Мелющий шар практически полностью изнашивается при эксплуатации (износ до 0,5–2,0 кг/т) и расходы на их приобретение составляют по разным оценкам от 15 до 35% от общих технологических затрат соответствующих производств. В связи с этим повышение долговечности шара на протяжении последних десятилетий не теряет своей актуальности в мировой практике [2].

Используемые сегодня в мире мелющие шары делятся на стальные катаные и чугунные литые. Катаные стальные шары в основном получают пластической деформацией на станах поперечно-винтовой прокатки, а также методом штамповки иковки.

Литые чугунные шары производят методами литья в кокиль, по датской технологии безопочного литья в песок (DISAMATIC), методом центробежного литья или на наклонно-поворотных разливочных машинах.

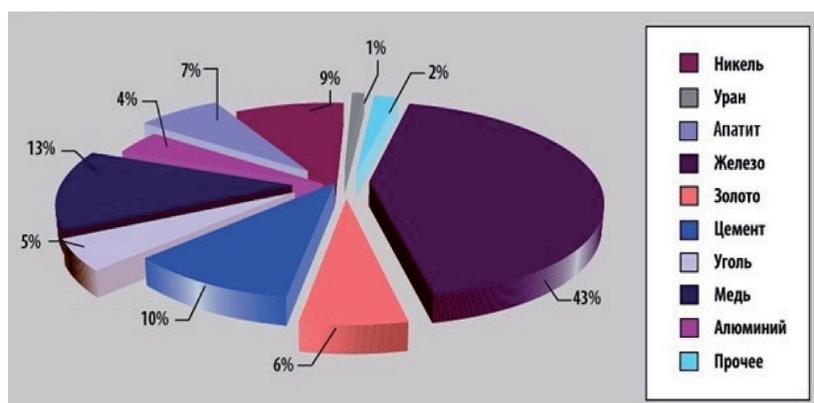


Рис. 1. Диаграмма потребления мелющих шаров по отраслям России

Группы шаров по твердости

Условный диаметр шара, мм	Твердость HRC (HB), не менее, для групп				
	1	2	3	4	
	на поверхности шара				на глубине ½ радиуса шара
15 – 70	43 (401)	49 (461)	55 (534)	55 (534)	45 (415)
80 – 100	40 (352)	42 (375)	52 (495)	–	–
110 – 120	35 (302)	38 (331)	50 (477)		

Примечание. Шары 4-й группы предназначены для измельчения руд цветных металлов, цемента и огнеупоров.

Стальные шары можно разделить на два класса.

Первый – это высококачественные стальные катаные изделия твердостью не ниже 62–65 HRC на поверхности и не менее 60 HRC в центре шара на диаметрах от 15 до 150 мм. Они изготавливаются из низколегированной углеродистой стали с содержанием хрома около 1%. Твердость достигается специальной системой полной закалки. Такая твердость уже давно отличает стальные шары, выпускаемые ведущими западными фирмами «AGS», «Gerdau Ameristeel», «Vitkovice» и др. Лидером в данном классе является южноафриканская компания Scow Metals. На принадлежащих ей десяти заводах выпускается около 600 тыс. т шаров под общим брендом Moly-Cor. Стоимость данной продукции превышает 800\$ за тонну на условиях EXW.

Второй – стальные катаные шары, выпускаемые в России по ГОСТ 7524-89 «Шары стальные мелющие для шаровых мельниц» имеют более низкий уровень качества. Твердость на поверхности шаров 35–45 HRC. Основная причина этого в том, что в большинстве случаев производство шаров рассматривалось как способ утилизации отходов, в частности использование отбраковки рельсовой заготовки. Твердость мелющих шаров, согласно этому стандарту, контролируется практически только на поверхности.

Шары по твердости подразделяют на четыре группы прочности:

- 1 – нормальной твердости общего назначения;
- 2 – повышенной твердости общего назначения;

3 – высокой твердости для измельчения руд черных металлов;

4 – особо высокой твердости для измельчения руд цветных металлов, цемента и огнеупоров.

Значения твердости поверхностных слоев шара различных групп прочности приведены в таблице.

Основные производители шаров в СНГ (рис. 2): Нижнетагильский МК – 33%, Новокузнецкий МК – 19, Гурьевский МЗ – 23, а также ЗАО «Кронтиф», который производит 7% (литых чугунных) шаров. Остальные 18% производимых в СНГ шаров приходятся на 12 металлургических предприятий.

Для шаров, выпускаемых на предприятиях стран России и СНГ, актуальным является повышение поверхностной твердости при увеличении глубины залегания упрочненного слоя. Для первичного грубого помола руд необходимо использование крупных шаров диаметром 110–120 мм. Из таблицы видно, что качество их не соответствует требованиям производства. На этих диаметрах 4-я группа твердости на поверхности и, тем более в середине шара не достигается. Качество катаного шара по ГОСТ 7524-89 отстает от мирового уровня по показателю поверхностной и объемной твердости, но не менее важным является его способность не раскалываться от соударений. Если имеются внутренние дефекты и не выдержан режим термического упрочнения, то шар быстро раскалывается и затем изнашивается.

По принятой на заводах СНГ технологии производства стальных катаных шаров непосредственно после прокатки изделия подвергаются неполной закалке в воду с последующим самоотпуском. При

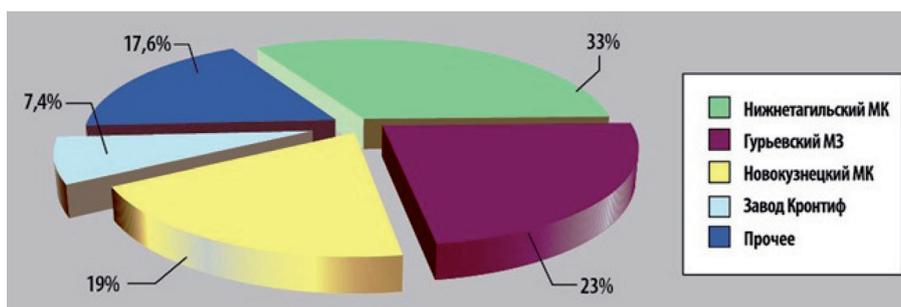


Рис. 2. Структура производителей мелющих шаров в СНГ

этом невозможно достигнуть сквозной прокаливаемости, толщина закаленного слоя (мартенситной скорлупы) не превышает 12–15 мм и твердость шара значительно снижается к центру. Кроме того, данная технология требует строгого температурного контроля – перекаленный продукт в мельнице может расколоться.

Стальные шары производятся на металлургических предприятиях Украины и России поперечно-винтовой прокаткой. На диаметрах 40–60 мм твердость на поверхности в лучшем случае 55–62 HRC при глубине закалки 10–15 мм, а подавляющее количество крупных шаров (диаметром 100, 120 мм) имеют твердость не выше 40 HRC. С введением в действие барабанных закалочных устройств на комбинатах «Азовсталь» и НТМК появилась возможность изготавливать катаные шары большого диаметра (80–120 мм) с твердостью на поверхности 50–57 HRC при глубине закалки 5–10 мм [3].

В настоящее время на Гурьевском металлургическом заводе освоен выпуск продукции из низколегированной хромистой стали, подвергаемой двухстадийной закалке. Закалка шаров происходит в два этапа в двух закалочных барабанах с промежуточной выдержкой на воздухе и последующим 8-часовым вылеживанием в специальных бункерах-термосах. В результате промежуточной выдержки на воздухе снижается градиент температур по сечению шара, уменьшаются закалочные напряжения. Легирование стали хромом повышает устойчивость переохлажденного аустенита, что существенно улучшает прокаливаемость. Сегодня ГМЗ стал практически единственным в СНГ производителем шаров диаметром 30–100 мм с регламентируемой твердостью по сечению изделия (4-й группы твердости), но на шарах диаметром 120 мм такого качества не достигли. На некоторых машиностроительных заводах шары изготавливаются ковкой и штамповкой. На Херсонском заводе карданных валов выпускают штампованные шары из стали 65Г различных типоразмеров, при этом шары диаметром 50–80 мм имеют на поверхности твердость 60–63 HRC, а диаметром 90–100 мм – твердость 58–62 HRC [4]. Технология малопроизводительная и дорогая.

Повышение поверхностной и объемной твердости стальных шаров производства Украины и России достигается за счет применения сталей с более высоким (по сравнению с обычно применяемыми сталями 45, 60, 65Г, М76 и др.) уровнем прокаливаемости, а также за счет перехода от термоупрочнения с самоотпуском к закалке с отдельного нагрева и низкотемпературному печному отпуску. Состав таких сталей для шаров различного

диаметра с разной глубиной закалки приведен в [5]. Дальнейшая перспектива в повышении износостойкости стальных мелющих шаров заключается в разработке и применении шаровых заэвтектидных сталей. В шарах из таких сталей возможно достижение двух микроструктурных состояний, обеспечивающих более высокую износостойкость по сравнению с мартенситом отпуска:

1) металлическая матрица отпущенного мартенсита с равномерно распределенными зернистыми включениями вторичного цементита;

2) аустенитно-мартенситная безкарбидная или содержащая малое количество карбидов структура, в которой аустенит обладает регулируемой склонностью к мартенситному превращению при изнашивании. Этот тип микроструктуры более предпочтителен, поскольку обеспечивает шарам повышенное сопротивление растрескиванию при закалке и расколам при эксплуатации за счет присутствия вязкого аустенита.

Однако достичь уровня качества стальных шаров Moly-Cor пока не удастся. На относительно небольших объемах производства затраты на специальное микролегирование для повышения прокаливаемости и на специальное технологическое оборудование для термообработки и получение объемно-закаленных шаров особо высокой прочности становятся не рентабельными.

Эта проблема может быть решена за счет применения новейших литейных технологий и оборудования для производства литых чугунных шаров. Примером такой технологии может являться наклонно-поворотная машина конструкции ОАО «БЕЛНИИЛИТ».

Литые чугунные шары можно также разделить на два класса.

Первый – высококачественные шары с содержанием хрома 13–23% и со сквозной твердостью 62–64 HRC. Само по себе большое содержание хрома не гарантирует указанной твердости. Для ее достижения необходимо использование высокотехнологичных процессов. Мировой лидер в данном классе – бельгийская компания Magotteaux выпускает около 320 тыс. т таких шаров в год на 16 заводах. Стоимость этих шаров сегодня превышает 1,1 тыс. евро за тонну на условиях EXW.

Второй – шары из рядового чугуна, привычные российскому потребителю. Твердость таких изделий при должном контроле качества может достигать на поверхности 50–52 HRC, но ударостойкость сравнительно низкая. Их основное конкурентное преимущество – дешевизна. Простота технологии производства делает их весьма распространенными во многих развивающихся странах.

До последнего времени внутренний рынок России оставался нетребовательным к качеству шаров. Но по мере развития интеграционных процессов с Западом переход на использование высококачественных дорожных изделий с лучшими эксплуатационными свойствами становится неизбежным. Без улучшения качества отечественных шаров со временем их место займет импорт и Россия попадет в зависимость от поставок этого стратегически важного ресурса.

По общему мнению, чугунные мелющие шары в связи с присутствием в структуре значительного количества карбидов обладают более высокой эксплуатационной стойкостью по сравнению со стальными шарами. Наиболее убедительно это показано на примере использования чугунных шаров в цементной промышленности, где эффект снижения удельного расхода по сравнению с коваными стальными шарами достигает 3–5 раз [6, 7]. Помимо меньшей потери массы, в чугунных шарах реализуется так называемый «зубчатый» эффект: направленное расположение кристаллов карбидов перпендикулярно к поверхности тела и их чередование с более мягкими прослойками матричной фазы, что создает специфическую шероховатость поверхности и улучшает измельчающий эффект за счет уменьшения проскальзывания между шарами и зернами размалываемого материала. Чугунные шары отечественного производства, как правило, имеют относительно небольшие размеры. Это связано с трудностями получения массивных тел (шаров) без внутренних литейных дефектов, которые бы не раскалывались при ударах в мельницах первой стадии переработки. В то же время фирмы Западной Европы («Sociedad Santa Ana de Bolueta», «Bradley and Foster», «Bragonzi» и др.) выпускают качественные мелющие чугунные шары диаметром до 100–125 мм включительно [8].

Таким образом, производство чугунных шаров в СНГ неизбежно будет развиваться по пути создания и применения технологий, позволяющих получение тел большого диаметра (100–120 мм) с плотной макроструктурой, обеспечивающей им высокую стойкость к расколу. Ударостойкость литых шаров может быть повышена введением в жидкий чугун дисперсных порошков тугоплавких соединений, частично или полностью устраняющих транскристаллитную структуру [9]. Обработка расплава комплексными модификаторами позволяет создавать в шарах структуру половинчатого чугуна с присутствием в центре отливки включений шаровидного графита, демпфирующих ударные нагрузки. Широкое внедрение технологий производства литых шаров повышенного качества в произ-

водство и использование этой продукции потребителями обусловлено действием ряда экономических предпосылок.

В последние годы производство стальных шаров на металлургических предприятиях-гигантах утратило свою утилизионную направленность как в связи с уменьшением объемов отбракованного металла, так и по причине экономической привлекательности и рентабельности выпуска шаров европейского качества. Также немаловажным аргументом в пользу применения более современных технологий производства мелющих шаров является повышение тарифов на электроэнергию и обеднение имеющихся руд. Более высокое качество шаров существенно снижает затраты на электроэнергию до 20% и повышает качество размола сырья.

Потребитель, применяя более качественные мелющие шары, преследует прежде всего цель снижения себестоимости своего основного производства. Эта цель достигается разными путями. Во-первых, за счет повышения эксплуатационной долговечности мелющих шаров обеспечивается снижение их удельного расхода на тонну готового продукта, что автоматически снижает расходы, связанные как с приобретением новых шаров, так и с их транспортировкой, складированием и загрузкой в мельницы. Так, проведенные на Центральном ГОК (г. Кривой Рог) испытания шаров комбината «Азовсталь» диаметром 120 мм 3-й группы твердости (477–520 НВ) в мельнице 1-й стадии измельчения показали снижение их удельного расхода на тонну готового концентрата на 11,4% по сравнению с шарами 2-й группы твердости (365–388 НВ) [3]. Аналогичные испытания на ЮГОК и ГОК «Миттал Стил» зафиксировали снижение удельного расхода шаров на 9,5 и 5,7% соответственно. Прямое снижение расходов наблюдается и в том случае, когда при одинаковой стойкости стальных и чугунных шаров затраты на приобретение последних оказываются ниже вследствие меньшей себестоимости и цены литых шаров [10]. Непрямые выгоды для потребителей от применения более качественных шаров заключаются в увеличении производительности помола (росте процента выхода фракции определенного класса). Например, названные выше испытания шаров диаметром 120 мм 3-й группы ДСТУ 3499 в условиях ЦГОК показали, что выход класса минус 0,074 мм возрос на 1,8 %, а производительность мельницы по вновь образованному классу минус 0,074 мм увеличилась на 13,3 %. Параллельно снижается удельный вес энергозатрат в себестоимости операции измельчения. При увеличении твердости ме-

лющих шаров диаметром 120 мм от 25–30 до 50–60 HRC в условиях Алмалыкского ГМК зафиксировано уменьшение удельного потребления электроэнергии на 0,41 кВт·ч на тонну переработанной медной руды [11]. Дополнительным фактором, стимулирующим горно-обогатительные предприятия к использованию высококачественных МТ, является рост извлекаемости полезного компонента из руды. Это происходит за счет лучшей раскрываемости сростков минералов, содержащих как полезный компонент, так и пустую породу. В цементной промышленности применение более долговечных литых чугунных шаров позволяет переходить на выпуск цемента повышенного класса прочности в связи со снижением содержания железосодержащих частиц износа в продуктах помола цементных мельниц.

Каждое рудное месторождение имеет свои индивидуальные особенности материала (прочность, измельчаемость, абразивность, состав пульпы и др.), что необходимо учитывать при его переработке. Тенденция возрастающих трудностей в добыче полезных ископаемых и все большего вовлечения в переработку бедных мелковкрапленных руд будет диктовать потребителям необходимость использования более качественных мелющих шаров и соответственно экономически стимулировать производителей к внедрению современных технологий получения данной продукции. В этих условиях производство и использование литых чугунных шаров в сравнении с катаными становится более выгодным как по рентабельности, так и по эффекту использования потребителем, что отражается на конкурентоспособности и рыночной цене этих изделий.

В заключение следует отметить, что в настоящее время в СНГ идет проработка нескольких проектов создания предприятий по выпуску мелющих шаров. Объем производства планируется от 15 до 70 тыс. т в год при номенклатуре по диаметрам от 20 до 120 мм. Использование традиционного подхода получения катаных стальных шаров в таком диапазоне вызывает необходимость разлива непрерывнолитой заготовки сечением не менее 200×220 мм (для шаров диаметром 100–120 мм), прокатку заготовки на реверсивном стане с диаметром валков не ниже 850 мм и далее на сортовом стане для получения проката диаметром 25–124 мм. Далее требуется установка трех клетей поперечно-винтовой прокатки, катающих шары диаметром 20–60 мм, 40–100 и 80–125 мм конструкции АКХ «ВНИИМЕТМАШ».

В одном из проектов строительства мини-завода для производства 30 тыс. т мелющих шаров диаметром 20–120 мм нами было принято решение ограничиться разливкой заготовки на МНЛЗ сечением 150×150 мм, установить стан горячей прокатки для получения подката для шаров диаметром от 22 до 124 мм. Шары диаметром от 20 до 90 мм катать на одном универсальном стане поперечно-винтовой прокатки, а шары диаметром 100–120 мм отливать из чугуна на наклонно-поворотной машине. Это проектное решение позволяет снизить расчетные капитальные затраты на оборудование: по МНЛЗ – на 22%, по прокатным станам – на 41%. Затраты на сквозной передел при производстве шаров диаметром 20–120 мм при использовании описанной выше технологии снижаются не менее чем 20%.

Литература

1. Краеугольный шар экономики / И. А. Зутлер // *Металлоснабжение и сбыт*. 2006. № 5.
2. Экономические предпосылки использования мелющих тел повышенного качества и технологические аспекты их производства / В. Г. Ефременко, Ф. К. Ткаченко, А. В. Вознюк, Е. С. Танчак // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2007. № 1/1 (25). С. 22–26.
3. Опыт освоения комбинатами «Азовсталь» технологии производства катаных мелющих шаров диаметром 120 мм с твердостью по 3-й группе прочности ДСТУ 3499 / В. Г. Ефременко, И. В. Ганошенко, Ф. К. Ткаченко и др. // *Металлургические процессы и оборудование*. 2006. № 3. С. 25–28.
4. Освоение производства штампованных мелющих шаров диаметром 100 мм повышенной твердости / В. Н. Агафонов, В. Г. Ефременко, Ю. А. Смолиенко и др. // *Металл и литье Украины*. 2005. № 1–2. С. 43–44.
5. Управление качеством продукции шаропркатного производства и расширение ее сортамента на ОАО МК «Азовсталь» / И. В. Ганошенко, В. Г. Ефременко, С. И. Дегтярев и др. // *Металл и литье Украины*. 2003. № 7–8. С. 50–55.
6. Цыпин И. И. Белые износостойкие чугуны. Структура и свойства. М.: *Металлургия*, 1983.
7. Владимирова А. А., Удовиков В. И., Косоногова Э. А. Применение высокохромистых чугунов для изготовления мелющих шаров // *Литейное производство*. 1991. № 8. С. 31–32.
8. Производство литых мелющих тел за рубежом / Д. К. Нестеров, А. Н. Клименко, В. И. Удовиков и др. // *БНТИ «Черная металлургия»*. 1986. № 10. С. 22–23.
9. Турина Т. В., Шкарупа И. Л., Лезник И. Д. Модифицирование чугунных мелющих шаров тонкодисперсными порошками оксидов алюминия // *Сталь*. 2003. № 5. С. 76–78.
10. Исследование качественных характеристик чугунных мелющих тел, производимых на Макеевском литейном заводе / А. А. Троянский, А. В. Мельник, А. И. Ярмоленко и др. // *Теория и практика металлургии*. 2003. № 4. С. 3–8.
11. Эффективность применения стальных мелющих шаров повышенной твердости при измельчении медных порфириновых руд / Н. В. Бессонникова, В. М. Вайсберг, А. В. Кирюшин и др. // *Обогащение руд*. 1990. № 1. С. 7–9.