

Ю. В. Моисеев, д-р техн. наук, ст. науч. сотр.

В. А. Твердохвалов, науч. сотр., e-mail: tverdohvalov@meta.ua

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

Литые мелющие тела

В кратком обзоре приведены сведения о требованиях к свойствам, фазовому составу и структуре сплавов, используемых в качестве материалов мелющих тел. Показаны преимущества низкоуглеродистых высокохромистых чугунов и целесообразность получения литых мелющих тел из этого чугуна различными методами литья.

Ключевые слова: мелющие тела, высокохромистые чугуны, методы литья.

Мелющие тела используют в горно-обогатительной, энергетической, химической, строительной и в ряде других отраслей промышленности для измельчения сырья до различной степени кратности измельчения, вплоть до порошков высокой дисперсности (от 0,1 до 50 мкм) [1]. Объем украинского рынка мелющих тел составляет 180–200 тыс. т, включая импортные поставки. На долю расходуемых мелющих тел приходится до 30 % затрат на измельчение сырья [2].

В качестве дробильно-помольного оборудования чаще всего используют механические мельницы барабанного типа, а в качестве измельчающей среды – катаные стальные шары, цилиндры и цельпессы, а также литые мелющие тела шаровидной, параболаидной и эллипсоидной формы из легированных чугунов.

Стальные катаные шары диаметром от 20 до 125 мм производят методом поперечно-винтовой прокатки на шаропрокатных станах из круглой прутковой заготовки с помощью валков, имеющих винтовые калибры. При выходе из валков шары охлаждаются и закаливают в воде, что обеспечивает их повышенную твердость. В Российской Федерации свыше 90 % стальных помольных шаров производят на шаропрокатных станах, разработанных и изготавливаемых ВНИИМетмаш и предназначенных для массового производства продукции. Для изготовления небольших партий помольных шаров используют поперечно-клиновые станы, разработанные белорусской фирмой «Белтехнология-М» и имеющие более низкую производительность и повышенный расход металла [3].

Утилизационная направленность выбора в качестве исходного сырья для стальных катаных шаров отходов из углеродистых сталей и, в частности, из бракованных рельсовых заготовок, ограничивает качество этих шаров, например, по такому показателю, как поверхностная твердость. Для шаров диаметром до 100 мм она составляет 40–45 HRC, в то время как стальные шары зарубежных поставок имеют твердость 62–64 HRC на поверхности и не менее 60 HRC в центре шара [4]. Твердость, конечно, не является главным фактором стойкости помольных шаров, поскольку их эксплуатационная долговечность зависит

от комплекса свойств: ударостойкости, усталостной прочности и сопротивления истиранию. Более того, на различных стадиях измельчения преимущественное значение имеют различные физические механизмы измельчения: хрупкое разрушение кусковых материалов, откалывание фрагментов кусковых материалов и их истирание. Опыт показал, что использование мелющих тел одного размера дает низкую производительность процесса измельчения. Предпочтительной является загрузка камеры измельчения шарами различных размеров, при этом, в многокамерных мельницах по мере повышения тонкости измельчения уменьшают долю массивных шаров и увеличивают (до 100 %) долю мелющих тел малых размеров. Это физически объяснимо постепенным переходом от дробления материала к его истиранию. Критической переоценке также подвергнуто представление, что рациональной формой мелющего тела является шар. Установлено, что после определенного периода приработки, мелющие шары приобретают эллипсоидную форму, что и побудило потребителей на завершающей стадии измельчения использовать мелющие тела эллипсоидной формы [5].

Поверхностная твердость стальных катаных шаров может быть повышена при использовании хромистой заэвтектидной стали в аустенитно-мартенситном структурном состоянии, однако, достичь уровня качества стальных помольных шаров ведущих западных поставщиков этой продукции пока не удается. Наряду с этим, тенденция использования мелющих тел с лучшими эксплуатационными свойствами стала определяющей в стратегическом развитии их производства. Авторы [4] склоняются к мнению, что проблема может быть решена за счет применения новейших литейных материалов, технологий и оборудования. Основное внимание обращают на возможность использования в качестве мелющих тел высокохромистых чугунов (12–18 % Cr) со сквозной твердостью 62–64 HRC для шаров диаметром 30–150 мм. Испытания в цементной промышленности показали, что эксплуатационная стойкость литых шаров из высокохромистого чугуна в 3–5 раз выше стойкости стальных катаных шаров, при этом снижается себестоимость производства основной продукции и повышается ее качество [6].

Основным легирующим элементом в износостойких чугунах является хром, препятствующий образованию и росту аустенитно-графитной эвтектики, заменяющий в цементите железо по мере увеличения количества хрома в чугуне и резко повышающий термическую устойчивость цементита. При увеличении содержания хрома свыше 7,0 % аустенитно-цементитную эвтектику «A+(Fe, Cr)₃C» постепенно замещает аустенитно-хромистокарбидная эвтектика «A+(Cr, Fe)₇C₃», имеющая существенно другую структуру и морфологию. Наиболее существенным для свойства износостойкости является то, что матричной фазой эвтектической колонии становится достаточно пластичный аустенит, обрастающий базовые стержни и ответвления твердой карбидной фазы [7]. Последняя имеет повышенную твердость и дисперсность, что и определяет, в основном, повышенную износостойкость высокохромистых чугунов. С увеличением содержания хрома до 16,0–18,0 %, основную долю карбидной фазы составляют карбиды (Cr, Fe)₇C₃, а чугун приобретает максимальную износостойкость. Дальнейшее увеличение содержания хрома приводит к появлению крупных и хрупких заэвтектических карбидов [8], разрушающихся при ударных нагрузках.

Максимальному уровню износостойкости соответствует определенное (25–30 %) количество карбидов (Cr, Fe)₇C₃, которое зависит не только от содержания хрома, но и от содержания углерода. Последнее близко к эвтектическому и составляет 3,0–3,6 %, а сам углерод является удобным регулятором количества карбидов в сплаве.

Важнейшее значение для износостойкости имеют размеры карбидов, равномерность их распределения в структуре сплава, а также их линейная направленность (по нормали к изнашиваемой поверхности). Увеличение размеров карбидов от 4 до 8 мкм снижает коэффициент износостойкости в 2,5 раза и зависит от скорости охлаждения затвердевающей отливки. Пороговое значение скорости охлаждения составляет 5 °С/мин, что может служить ориентиром при выборе материала и технологии литейной формы, а также массы и конструктивных размеров отливки. Линейная направленность карбидов по нормали к изнашиваемой поверхности определяется направленностью теплоотвода и является положительным фактором, препятствующим износу, если не образуется транскристаллическая структура [9]. Эффективным способом устранения транскристаллизации является модифицирование жидкого металла некоторыми элементами и дисперсными частицами [10].

Аустенитная матричная фаза должна также соответствовать определенным требованиям твердости, прочности и вязкости. Различным условиям изнашивания благоприятны либо мартенситная, либо аустенитно-мартенситная структура (с остаточным содержанием аустенита не более 15 %).

Термическая обработка включает нагрев до температуры 930–980 °С, выдержку при этой температуре (2–4 часа, в зависимости от массы отливки и особенностей литой структуры), закалку с ограниченной

критической скоростью охлаждения и низкотемпературный отпуск.

При выборе режимов термической обработки важнейшее значение имеют: требуемый уровень гомогенизации литой структуры сплава, необходимость подавления фазовых превращений выше температуры начала мартенситного превращения и исключение возможности появления закалочных трещин. Последнее условие выполнимо при охлаждении отливки от температуры нагрева под закалку на воздухе, то есть достаточно медленном охлаждении, что влечет за собой риск появления в структуре нежелательных продуктов промежуточных превращений. Для подавления этих превращений (повышения прокаливаемости) ограничивают содержание углерода (до 2,0 %) и кремния (до 0,7 %) и легируют чугун такими элементами, как Mo, W, V, Ni. Повышает прокаливаемость также марганец, однако, как активный стабилизатор аустенита, при содержании более 3–5 %, он способствует возрастанию в сплаве количества остаточного аустенита, что снижает износостойкость. Конкретные условия производства и экономические требования определяют выбор наиболее доступных и эффективных комплексных способов обеспечения требуемой структуры и свойств литых мелющих тел из хромистого чугуна.

Для изготовления мелющих тел различных типоразмеров используют различные литейные технологии.

Литье шаров диаметром 60–100 мм из высокохромистого чугуна в песчано-глинистые формы, с охлаждением на воздухе от температуры нагрева под закалку, обеспечивает (при содержании молибдена 0,7–0,9 %) достаточно высокие свойства – твердость у поверхности 58,5–62 HRC, высокую ударостойкость (более 20 кДж), в 2,3 раза более низкий удельный расход по сравнению со стальными шарами (для условий измельчения железной руды на Михайловском ГОКе). Повышенное качество обусловлено однородностью структуры шаров по их поперечному сечению и достаточно высокой плотностью металла вследствие эффективной подпитки медленно затвердевающих отливок. Аналогичные шары, изготовленные с использованием кокильных шаролитейных машин карусельного типа, имели значительные газоусадочные дефекты и пониженную ударостойкость, хотя их удельный расход был ниже по сравнению со стальными шарами. И в первом, и во втором случае характерной была трооститно-мартенситная структура металлической основы, аустенитно-карбидная (на базе (Fe, Cr)₇C₃ карбида) эвтектика и остаточный аустенит. Для кокильных отливок отмечали закалочные трещины глубиной до 10 мм и повышенную зону усадочной пористости в центре шаров. Свойства кокильных отливок могут быть повышены увеличением прибыльной части отливки до 50 % (ее массы), что, по-видимому, нерентабельно в массовом производстве. Авторы отмечают необходимость оптимизации соотношения хрома и марганца в высокохромистом чугуне с целью уменьшения содержания молибдена в сплаве и считают наиболее эффективной и высокопроизводительной технологию изготовления мелющих тел на автоматизированных линиях безопочной формовки [12].

Лидером в области безопасной вертикальной формовки является датская фирма DISA Industries A/S. Фирма предлагает комплекс литейного оборудования для изготовления из высокохромистого чугуна мелющих шаров диаметром от 25 до 100 мм (формовочные линии DISAMATIC-2110 производительностью около 300 форм/час; годовой объем производства отливок – от 2,5 до 8,0 тыс. т/год); выход годного – до 65 %). Периодически (20 шаров из партии) проверяется твердость *HRC* и ударостойкость (10 шаров из партии). Сквозная твердость составляет – $62 HRC \pm 2HRC$ [13].

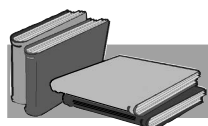
Исследования в области использования кокильных технологий для получения шаровых мелющих тел позволили выявить оптимальную микроструктуру и свойства шаровых мелющих тел из белого износостойкого чугуна с твердостью не превышающей 45 *HRC*. Для обеспечения заданных свойств шаров диаметром 60 мм оптимальным является чугун имеющий 3,4 % С, 1 % Si и 1,8 % Mn [14].

Заслуживает внимания технология кокильного литья чугуновых шаров диаметром 125 мм с направленно-последовательной кристаллизацией с выходом годного до 85 %, хотя авторы и не приводили оценок качества этих шаров даже по такой характеристике как твердость [15].

Этапом исторической хронологии становления технологии получения литых мелющих шаров из белого чугуна является технология непрерывной отливки шаров в водоохлаждаемые медные кокили с подпиткой затвердевающих отливок жидким металлом из заливающей струи [16]. Шаролитейные машины, основанные на этом принципе литья, до сих пор находят практическое применение, хотя их производительность далеко уступает безопасной формовке.

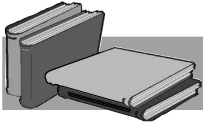
Конкурентоспособной с безопасной формовкой является технология получения шаровых мелющих тел при литье по выжигаемым моделям. Эта конкурентоспособность заключается в повышенной объемной металлоемкости форм и, соответственно, в повышенном выходе годного (до 85 %). Однако, необходима стабилизация структурного состояния и твердости по диаметру чугуновых шаров как малого (25 мм), так и большого (125 мм) размеров, что естественно следует из условий затвердевания отливок [17].

Таким образом, потребителю предоставляются широкие возможности выбора литых мелющих тел различного типоразмера и качества, удовлетворяющие многообразию условий измельчения сырьевых ресурсов.



ЛИТЕРАТУРА

1. Несвижский О. А. Производство мелющих тел для шаровых мельниц. – М.: ГНТИМашгиз, 1961. – 151 с.
2. Игнатов В. А., Смирнов И. Х., Станиловский Т. Б., Солёный В. К. Использование чугуновых литых мелющих тел – один из путей повышения эффективности производства // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1997. – № 4. – С. 75–77.
3. Обзор рынка стальных помольных (мелющих) шаров и оборудования для их производства в СНГ. URL: <http://www.infomine.ru>
4. Стеблов А. Б., Березов С. В., Козлов А. А. Литые чугуновые шары для помола материалов // *Литье и металлургия*. – 2012. – № 3 (66). – С. 45–49.
5. Игнатов В. А., Пахомов А. А., Троянский А. А., Жук В. Л., Туяхов А. И., Ярмоленко А. И., Соболев А. Н. Литые чугуновые мелющие тела эллипсоидной формы, обеспечивающие ресурсо-энергосбережение при измельчении сырья и материалов. Донбасс-2020: наука и техника производства: материалы II науч.-пр. конф., 05–06 февраля 2002 г. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – С. 319–324.
6. Владимиров А. А., Удовиков В. И., Косоконова Э. И. Применение высокохромистых чугунов для изготовления мелющих шаров // *Литейное производство*. – 1991. – № 8. – С. 31–32.
7. Таран Ю. Н., Снаговский В. М. Морфология эвтектики в Fe-C-Cr сплавах // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1966. – № 4. – С. 27–30.
8. Гарбер М. Е., Цылин И. И. Основы подбора состава и структуры износостойких отливок из белого чугуна // *Литейное производство*. – 1970. – № 2. – С. 2–6.
9. Чугун: справочник / под ред. А. Д. Шермана и А. А. Жукова. – М.: Металлургия, 1991. – 575 с.
10. Ри Хосен, Дзюба Г. С., Ри Э. Х., Ермаков М. А., Мамонтова Е. С. Управление структурой и свойствами хромистых белых чугунов путем их модифицирования // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2015. – том 58. – № 6. – С. 412–416.
11. Гарбер М. Е. Отливки из белых износостойких чугунов. – М.: Машиностроение, 1972. – 112 с.
12. Солёный В., Пыхтин Я., Владимиров А., Косоконова Э. Производство и использование мелющих тел из высоколегированного чугуна // *Промышленность Казахстана*. – 2013. – № 10. – С. 48–50.
13. Баринев С. Г., Слабко М. Л. Производство высокохромистых мелющих тел на линиях компании DISA // *Литье Украины*. – 2013. – № 4(152). – С. 1–9.
14. Поддубный А. Н. Структура и свойства мелющих шаров из легированного белого чугуна при литье в кокиль // *Литейное производство*. – 1977. – № 3. – С. 8–11.
15. Мельников А. Т. Технология и оборудование для производства отливок, работающих в условиях ударно-абразивного износа // *Литейное производство*. – 2010. – № 9. – С. 19–23.
16. Стовлченко П. И., Воронова Н. А. Непрерывная отливка шаров // *Литейное производство*. – 1962. – № 3. – С. 9–13.
17. Белоусова Е. П., Шинский О. И. Альтернативные методы изготовления литых мелющих тел // *Процессы литья*. – 2005. – № 3. – С. 65–68.



REFERENCES

1. Nesvizhskii A. A. (1961). Proizvodstvo meliushchikh tel dlia sharovykh mel'nits [Production of grinding bodies for ball mills]. Moscow: GNTIMashgiz, 151 p. [in Russian].
2. Ignatov V. A., Smirnov I. Kh., Stanilovsky T. B., Solenyi V. K. (1997). Ispol'zovanie chugunnykh litykh meliushchikh tel – odin iz putei povysheniia effektivnosti proizvodstva [Use of cast iron molten bodies is one of the ways to improve production efficiency]. Metallurgicheskaia i gornorudnaia promyshlennost', no. 4, pp. 75–77. [in Russian].
3. Obzor rynka stal'nykh pomol'nykh (meliushchikh) sharov i oborudovaniia dlia ikh proizvodstva v SNG [Market overview of steel grinding (milling) balls and equipment for their production in the CIS]. URL: <http://www.infomine.ru> [in Russian].
4. Steblov A. B., Berezov S. V., Kozlov A. A. (2012). Litye chugunnye shary dlia pomola materialov [Cast iron balls for grinding materials]. Lit'e i metallurgiiia, no. 3 (66), pp. 45–49 [in Russian].
5. Ignatov V. A., Pakhomov A. A., Troiansky A. A., Zhuk V. L., Tuiakhov A. I., Yarmolenko A. I., Sobolev A. N. (2002). Litye chugunnye meliushchie tela ellipsoidnoi formy, obespechivaiushchie resurso-ehnergoberezhenie pri izmel'chenii syr'ia i materialov. Donbass-2020: nauka i tekhnika proizvodstva: materialy II nauch.-pr. konf., 05–06 fevralia 2002 g. [Cast cast-iron grinding bodies of ellipsoidal shape, providing resource-energy saving in grinding raw materials and materials. Donbass-2020: science and technology of production: materials of the 2nd scientific-research conference, 05-06 February, 2002]. Donetsk: DonNTU, pp. 319–324 [in Russian].
6. Vladimirova A. A., Udovikov V. I., Kosogonova E. I. (1991). Primenenie vysokokhromistykh chugunov dlia izgotovleniia meliushchikh sharov [The use of high-chromium cast iron for manufacturing grinding balls]. Liteinoe proizvodstvo, no. 8, pp. 31–32 [in Russian].
7. Taran Yu. N., Snagovsky V. M. (1966). Morfologiiia evtetiki v Fe-C-Cr splavakh [Morphology of the eutectic in Fe-C-Cr alloys]. Metallovedenie i termicheskaia obrabotka metallov, no. 4, pp. 27–30 [in Russian].
8. Garber M. E., Tsy-pin I. I. (1970). Osnovy podbora sostava i struktury iznosostoikikh otlivok iz belogo chuguna [Fundamentals of the selection of the composition and structure of wear castings of white cast iron]. Liteinoe proizvodstvo, no. 2, pp. 2–6 [in Russian].
9. Chugun: spravochnik. Pod red. A. D. Shermana i A. A. Zhukova (1991). [Cast iron: reference book. Ed. by A. D. Sherman and A. A. Zhukov]. Moscow: Metallurgiiia, 575 p. [in Russian].
10. Ri Khosen, Dziuba G. S., Ri E. Kh., Ermakov M. A., Mamontova E. S. (2015). Upravlenie strukturoi i svoistvami khromistykh belykh chugunov putem ikh modifitsirovaniia [Controlling the structure and properties of chromium white cast iron by modifying them]. Izvestiia Vuzov. Chernaia metallurgiiia, vol. 58, no. 6, pp. 412–416 [in Russian].
11. Garber M. E. (1972). Otlivki iz belykh iznosostoikikh chugunov [Castings from white wear-resistant cast irons]. Moscow: Mashinostroenie, 112 p. [in Russian].
12. Solenyi V., Pykhtin Ya., Vladimirova A., Kosogonova E. (2013). Proizvodstvo i ispol'zovanie meliushchikh tel iz vysokolegirovannogo chuguna [Production and use of grinding bodies from high-alloyed cast iron]. Promyshlennost' Kazakhstana, no. 10, pp. 48–50 [in Russian].
13. Barinov S. G., Slabko M. L. (2013). Proizvodstvo vysokokhromistykh meliushchikh tel na liniiah kompanii DISA [Production of high-chromium grinding bodies on the lines of DiSA]. Lit'e Ukrainy, no. 4 (152), pp. 1–9 [in Russian].
14. Poddubnyi A. N. (1977). Struktura i svoistva meliushchikh sharov iz legirovannogo belogo chuguna pri lit'e v kokil' [Structure and properties of grinding balls from alloyed white iron during casting into chill molds]. Liteinoe proizvodstvo, no. 3, pp. 8–11 [in Russian].
15. Mel'nikov A. T. (2010). Tekhnologiiia i oborudovanie dlia proizvodstva otlivok, rabotaiushchikh v usloviakh udarno-abrazivnogo iznosa [Technology and equipment for the production of castings operating under shock abrasive wear]. Liteinoe proizvodstvo, no. 9, pp. 19–23 [in Russian].
16. Stovpchenko P. I., Voronova N. A. (1962). Nepreryvnaia otlivka sharov [Continuous casting of balls]. Liteinoe proizvodstvo, no. 3, pp. 9–13 [in Russian].
17. Belousova E. P., Shinsky O. I. (2005). Al'ternativnye metody izgotovleniia lityh meliushchikh tel [Alternative methods of making cast grinding bodies]. Protsesty lit'ia, no. 3, pp. 65–68 [in Russian].

Анотація

Моїсєєв Ю. В., Твердохвалов В. О.
Літі мелючі тіла

В короткому огляді наведено відомості про вимоги до властивостей, фазового складу та структури сплавів, що використовуються в якості матеріалів мелючих тіл. Показано переваги низьковуглецевих високохромистих чавунів та доцільність отримання литих мелючих тіл з цього чавуну різними методами литва.

Ключові слова

Мелючі тіла, високохромисті чавуни, методи литва.

Summary

Moiseev Yu., Tverdokhvalov V.

Cast grinding bodies

Information on the requirements for the properties, phase composition and structure of alloys used as grinding bodies materials is shown. The advantages of low-carbon high-chromium cast-iron and the expediency of production of cast grinding bodies from this cast-iron are shown by various casting methods.

Keywords

Grinding bodies, high-chromium cast-irons, methods of casting.

Поступила 07.11.17