

УДК 621.771.65

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАКРО- И МИКРОСТРУКТУРЫ СТАЛЬНЫХ ПОМОЛЬНЫХ ШАРОВ НА ИХ УДАРНУЮ СТОЙКОСТЬ*

*Уманский А.А.¹, к.т.н., доцент, директор Центра коллективного пользования
«Материаловедение» (umanski@bk.ru)*

Головатенко А.В.², к.т.н., директор по рельсовому производству (Aleksey.Golovatenko@evraz.com)

*Осколкова Т.Н.¹, к.т.н., доцент, доцент кафедры обработки металлов давлением
и металловедения. ЕВРАЗ ЗСМК (oskolкова@kuz.ru)*

*Симачев А.С.¹, к.т.н., ведущий инженер кафедры обработки металлов давлением
и металловедения. ЕВРАЗ ЗСМК (simachev_as@mail.ru)*

Щукин А.Г.¹, аспирант кафедры металлургии черных металлов (schukin_ag@ke.mrsks.ru)

¹ Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»
(654043, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ш. Космическое, 16)

Аннотация. На основании анализа литературных и производственных данных показано, что износостойкость стальных помольных шаров, являющихся основной измельчающей средой при дроблении различных видов сырья в мельницах барабанного типа, определяется не только твердостью поверхностного слоя, но и качеством их макро- и микроструктуры. При этом имеет место сложный характер зависимостей ударной стойкости шаров от вышеперечисленных параметров при одновременном их воздействии. Это обуславливает актуальность проведения исследований в данном направлении. С целью получения научно-обоснованных зависимостей ударной стойкости помольных шаров от качества их макро- и микроструктуры проведена серия экспериментальных исследований. В качестве объекта использовали помольные шары диаметром 40, 50 и 60 мм производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК» (г. Новокузнецк) и ООО «Промышленные системы» (г. Нижний Тагил). Исследования проведены металлографическим, дюрOMETрическим и фрактографическим методами анализа. Испытания помольных шаров на ударную стойкость проводили на копровой установке. По результатам проведенных металлографических исследований определено, что для объемно-закаленных шаров характерна трехзонная структура. Поверхностный закаленный слой глубиной от 1,9 до 7,4 мм представляет собой мартенсит. Переходная зона толщиной от 1,0 до 1,7 мм имеет структуру мартенсит + троостит. Центральная зона занимает весь оставшийся объем шара и имеет несколько вариантов разновидности микроструктуры: феррит + перлит, мартенсит + троостит + феррит, мартенсит + троостит. На основании обобщения полученных экспериментальных данных установлено, что при поверхностной твердости шаров в пределах 42 – 52 HRC параметром, определяющим ударную стойкость, является качество макроструктуры (наличие флокенов). Для шаров с высокой (57 – 61 HRC) поверхностной твердостью наиболее значимое влияние на ударную стойкость оказывает неоднородная микроструктура металла, обуславливающая значительный перепад твердости по сечению шаров.

Ключевые слова: помольные шары, ударная стойкость, микроструктура, флокены, твердость, фрактографические исследования.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-4-283-289

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день в различных отраслях промышленности измельчается более 2 млрд. т сырья [1, 2]. При этом одним из основных видов оборудования являются мельницы барабанного типа, использующие в качестве измельчающей среды стальные помольные шары [3 – 8]. Качество помольных шаров, характеризующееся износостойкостью, в значительной степени определяет технико-экономическую эффективность процессов дробления сырья. В случае преждевременного износа шаров не только увеличивается их удельный расход,

но и ухудшается качество измельчаемого сырья за счет попадания в него частиц расколотых помольных шаров [6 – 11].

Значительную долю стальных помольных шаров в отечественной металлургии производят методом поперечно-винтовой прокатки на специализированных шаропрокатных станах, что объясняется технико-экономической эффективностью такого способа по сравнению с их производством штамповкой: повышенная в 2 – 8 раз производительность и сниженный на 10 – 15 % удельный расход металла на производство готовой продукции [12 – 18]. В составе действующих шаропрокатных станков в обязательном порядке предусмотрены закалочные устройства. Закалка шаров производится, как правило, в водной среде и имеет основной целью получение высокой твердости поверхностного слоя, непосред-

* Работа выполнена в СибГИУ с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Материаловедение» в рамках базовой части Государственного задания Минобрнауки РФ № 11.6365.2017/8.9.

венно подвергающегося действию ударных нагрузок при эксплуатации помольных шаров [19 – 22].

Следует отметить, что износостойкость помольных шаров определяется не только твердостью поверхностного слоя, но и качеством их макро- и микроструктуры. Внутренние дефекты в виде несплошностей выступают в роли концентраторов напряжений и являются причиной раскола шаров в процессе эксплуатации [23 – 25]. Расколу шаров также может способствовать неоптимальная закалочная микроструктура, обуславливающая значительную неравномерность распределения твердости по объему шара [26 – 28]. Сложный характер зависимостей показателей ударной стойкости шаров от одновременного воздействия вышеперечисленных параметров (поверхностная и объемная твердость, закалочная микроструктура, наличие и характеристики внутренних дефектов) обуславливает актуальность проведения исследований в этом направлении.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

С целью получения научно-обоснованных зависимостей ударной стойкости помольных шаров от качества их макро- и микроструктуры проведена серия экспериментальных исследований. В качестве объекта исследований использовали помольные шары диаметром 40, 50 и 60 мм производства АО «ЕВРАЗ Западно-Сибирский металлургический комбинат» (ЕВРАЗ ЗСМК) (г. Новокузнецк) и ООО «Промышленные системы» (г. Нижний Тагил). Испытания на ударную стойкость проводили на копровой установке. Для анализа параметров микроструктуры объемно-закаленных шаров использовали металлографический (с помощью металлографических микроскопов OLIMPUS GX-51, Лабо Мет 1И) и дюротрический (замер твердости на твердомере ТК-2М) методы исследования. Для анализа характера изломов шаров, не выдержавших испытания на ударную стойкость, применяли фрактографический метод исследований.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе анализировали ударную стойкость шаров diam. 50 и 60 мм производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Испытаниям на копровой установке подвергали шары, прокатанные из заготовок с флокенами, и шары, произведенные из заготовок без видимых дефектов макроструктуры. Полученные результаты свидетельствуют о значительно более низкой ударной стойкости шаров с дефектами макроструктуры.

Диаметр шаров, мм	Качество макроструктуры исходных заготовок	Доля расколовшихся шаров, %	Количество ударов
50	Наличие флокенов	100	8 – 10
	Без видимых дефектов	0	70
60	Наличие флокенов	100	40 – 50
	Без видимых дефектов	9	50

Проведенными фрактографическими исследованиями подтверждено наличие флокенов в изломах шаров, не выдержавших испытания на ударную стойкость, и прокатанных из заготовок, отбракованных по данному виду дефекта. На поверхности разрушения выявлены участки в виде светлых пятен, имеющих более крупнокристаллическое строение по отношению к основному металлу (рис. 1). В соответствии с классификацией изломов, данной в работе [29], указанные дефекты имеют основные признаки флокенов – «... имеют гладкую серебристую кристаллическую поверхность стенок», «Если поверхность флокенов совпадает с плоскостью излома, то они резко выделяются своим блеском ..., на фоне излома с кристаллическим строением менее заметны и отличаются более светлой окраской».

Фрактографические исследования шаров, прокатанных из заготовок без видимых дефектов макроструктуры, выявили изломы кратковременного нагружения (рис. 2). Характер изломов характеризуется кристал-

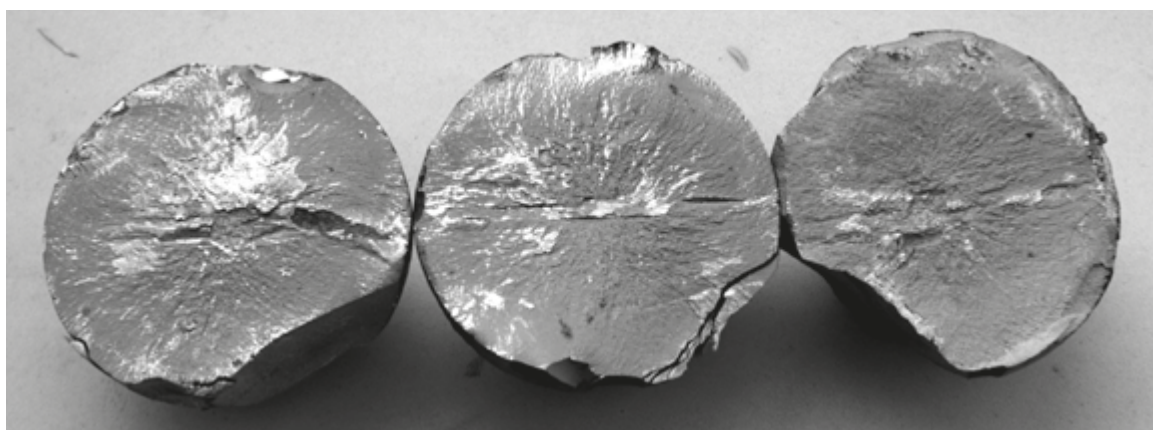


Рис. 1. Общий вид изломов шаров, прокатанных из заготовок с флокенами

Fig. 1. General view of the fractures of balls rolled from billets with flakes

лическим строением основной площадки излома и наличием рубцов, лучеобразно расходящихся из зоны начала разрушения. У начала разрушения рубцы мелкие, а по мере продвижения становятся грубее. Наблюдается достаточно четкая граница между зоной медленного разрушения и зоной, где разрушение шло с большей скоростью.

Сравнительный анализ микроструктуры шаров, не выдержавших испытания на ударную стойкость, от плавок с дефектами макроструктуры в виде флок-

нов и без указанных дефектов показал, что для всех исследованных шаров характерна трехзонная структура. Наблюдаются поверхностный закаленный слой глубиной от 1,9 до 7,4 мм, переходная зона толщиной от 1,0 до 1,7 мм и центральная зона, занимающая весь оставшийся объем шара. При этом в рамках трехзонной структуры можно выделить несколько вариантов строения металла. Так, для 42 % исследованных шаров микроструктура поверхностного слоя представляет собой мартенсит твердостью 50 – 51 HRC (рис. 3, а), в пе-

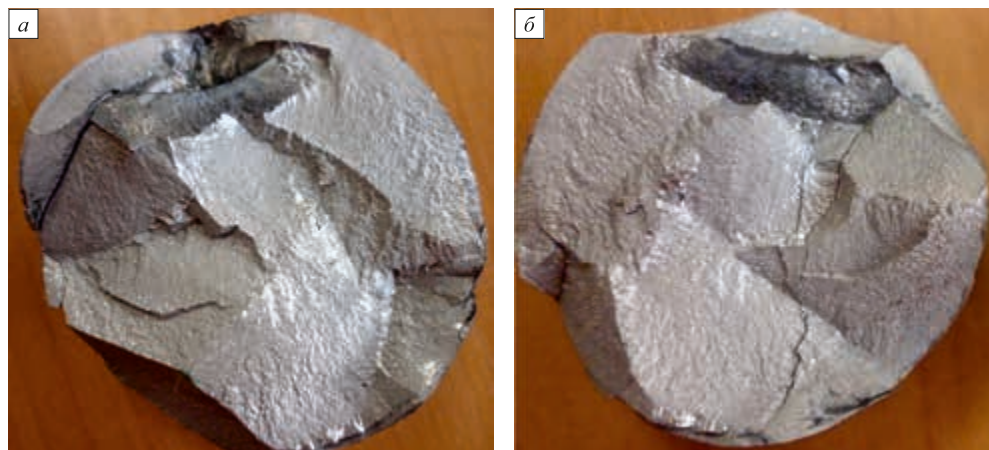


Рис. 2. Общий вид изломов шаров, прокатанных из заготовок без дефектов макроструктуры

Fig. 2. General view of the fractures of balls rolled from billets without macrostructure defects

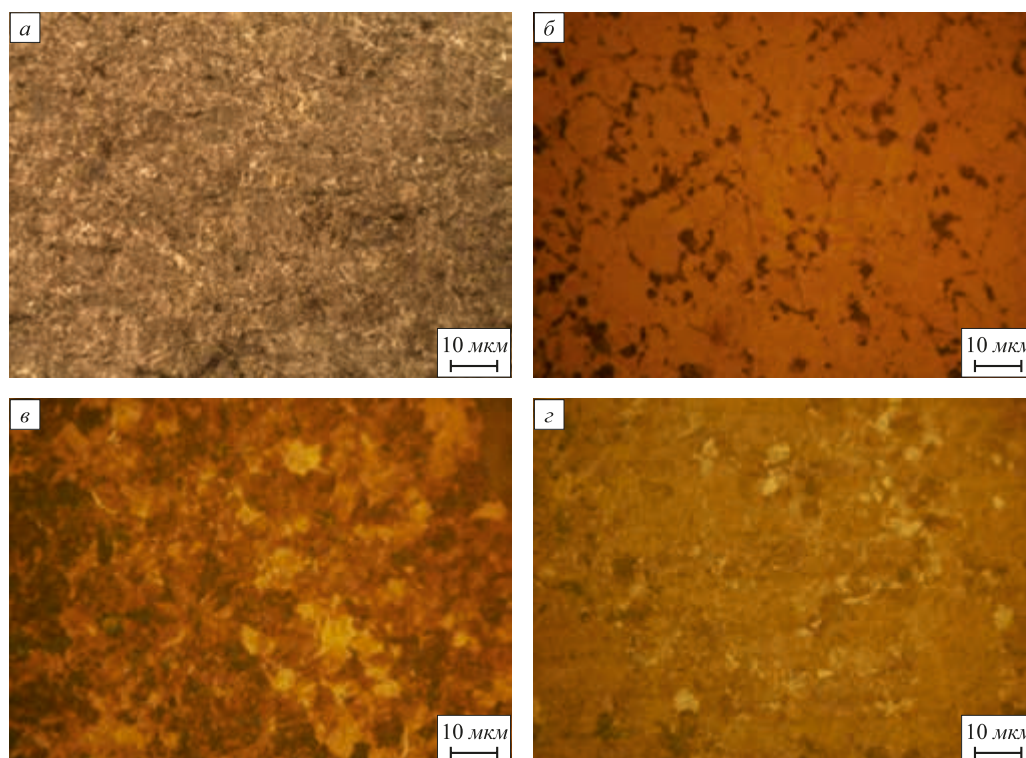


Рис. 3. Микроструктура шаров после закалки:
а – поверхностный слой; б – переходный слой; в и г – центральная зона

Fig. 3. Microstructure of the balls after quenching:
а – surface layer; б – transition layer; в and г – central zone

реходной зоне выявлена структура мартенсит + троостит твердостью 37 – 41 HRC (рис. 3, б), а в центральной части шаров имеет место исходная феррито-перлитная структура твердостью порядка 230 – 235 НВ (рис. 3, в). Микроструктура 37 % исследованных шаров аналогична предыдущему варианту за исключением центральной зоны, где имеет место микроструктура мартенсит (незначительное количество) + троостит + феррит с твердостью порядка 32 HRC (рис. 3, з). Характерной особенностью третьего варианта распределения микроструктур в объеме шаров является наличие структуры мартенсит + троостит во всем объеме шара с постепенным снижением количества мартенсита по мере продвижения к центральной зоне (рис. 4) и соответствующим снижением твердости от 42 – 44 HRC на поверхности до 30 HRC в сердцевине. Такая микроструктура выявлена у 21 % исследованных шаров. Полученные данные об ударной стойкости шаров с различным распределением микроструктур обобщены (см. таблицу) и свидетельствуют об отсутствии значимого влияния данного параметра на ударную стойкость.

Таким образом, можно сделать вывод, что для исследованного массива помольных шаров производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК» фактором, определяющим ударную стойкость, является качество макроструктуры, а именно, наличие флокенов.

Следует отметить, что полученные результаты качественно согласуются с данными исследований ударной стойкости шаров производства комбината «Азовсталь» и Днепровского металлургического комбината [27], согласно которым для шаров с умеренной и средней поверхностной твердостью ударная стойкость в наибольшей степени зависит от наличия таких дефектов, как остатки усадочной раковины и флокены.

Исследования микроструктуры шаров производства ООО «Промышленные системы», расколовшихся в процессе эксплуатации, показали в поверхностном слое наличие структуры крупноигльчатого мартенсита твердостью порядка 61 HRC. При этом в центральной части шаров диам. 40 мм выявлена структура крупноигльчатый мартенсит + троостит (рис. 5, а) твердостью 46 – 50 HRC, для шаров диам. 60 мм микроструктура центральной части шара представлена крупноигльчатым мартенситом и сфероидальным трооститом (рис. 5, б) твердостью 43 – 48 HRC. Исследование микроструктуры шаров из той же партии без видимых следов износа показало значительно меньший перепад твердости по сечению за счет более низкой твердости поверхностного слоя (48 – 52 HRC). При макроскопическом исследовании примерно на 50 % исследуемых шаров как расколовшихся в процессе эксплуатации, так и без видимых следов износа выявлены локально расположенные трещины.

В результате можно сделать вывод, что высокая поверхностная твердость является фактором, значительно повышающим вероятность возникновения трещин

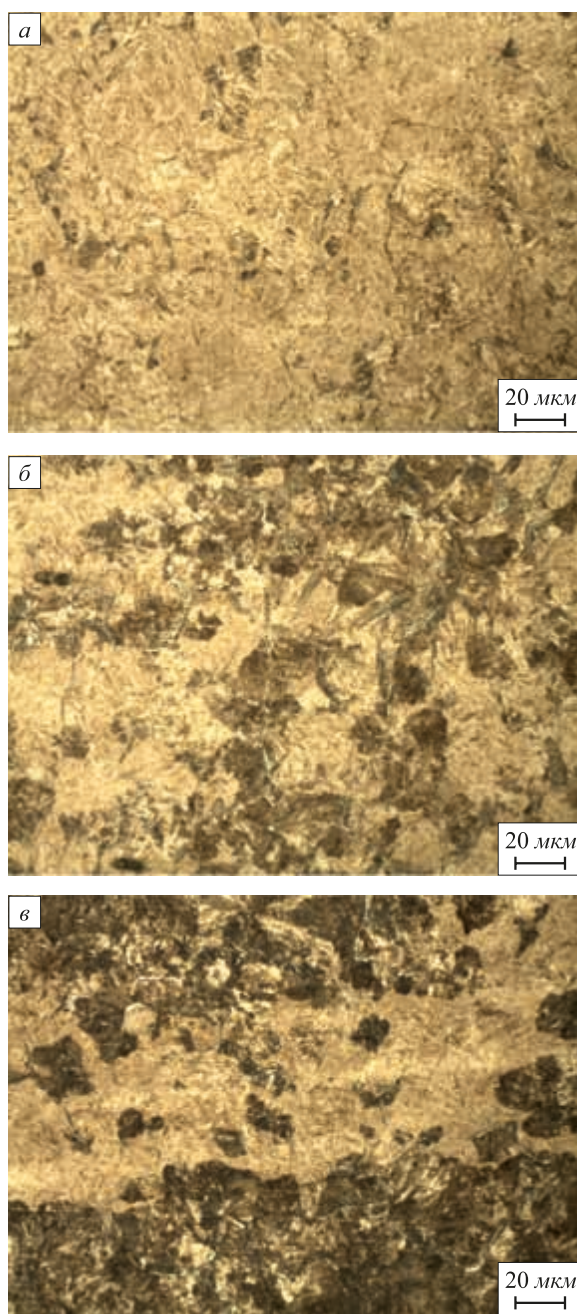


Рис. 4. Микроструктура шаров после закалки: а – поверхностный слой; б – переходный слой; в – центральная зона

Fig. 4. Microstructure of the balls after quenching: а – surface layer; б – transition layer; в – central zone

и последующего раскола помольных шаров при воздействии ударных нагрузок вне зависимости от качества макроструктуры стали.

Выводы

На основании исследований ударной стойкости помольных шаров диам. 40 – 60 мм установлено, что для помольных шаров с поверхностной твердостью в пределах 42 – 52 HRC параметром, определяющим ударную стойкость, является качество макрострук-

Результаты испытаний шаров с различной закалочной микроструктурой на ударную стойкость

Results of impact resistance testing of balls with different quenching microstructure

Вариант распределения микроструктур	Зона шара	Описание микроструктуры	Твердость	Доля расколовшихся шаров, %
Шары диаметром 50 мм				
1	поверхностная	мартенсит	50 – 51 HRC	48
	переходная	мартенсит + троостит	38 – 40 HRC	
	центральная	феррит + перлит	232 – 235 HB	
2	поверхностная	мартенсит	47 – 50 HRC	53
	переходная	мартенсит + троостит	37 – 39 HRC	
	центральная	мартенсит + троостит + феррит	32 – 34 HRC	
3	поверхностная	мартенсит + троостит	42 – 44 HRC	49
	переходная	мартенсит + троостит	36 – 38 HRC	
	центральная	мартенсит + троостит	30 – 32 HRC	
Шары диаметром 60 мм				
1	поверхностная	мартенсит	48 – 51 HRC	57
	переходная	мартенсит + троостит	37 – 41 HRC	
	центральная	феррит + перлит	230 – 234 HB	
2	поверхностная	мартенсит	46 – 48 HRC	51
	переходная	мартенсит + троостит	38 – 40 HRC	
	центральная	мартенсит + троостит + феррит	31 – 33 HRC	
3	поверхностная	мартенсит + троостит	43 – 44 HRC	54
	переходная	мартенсит + троостит	35 – 39 HRC	
	центральная	мартенсит + троостит	31 – 33 HRC	

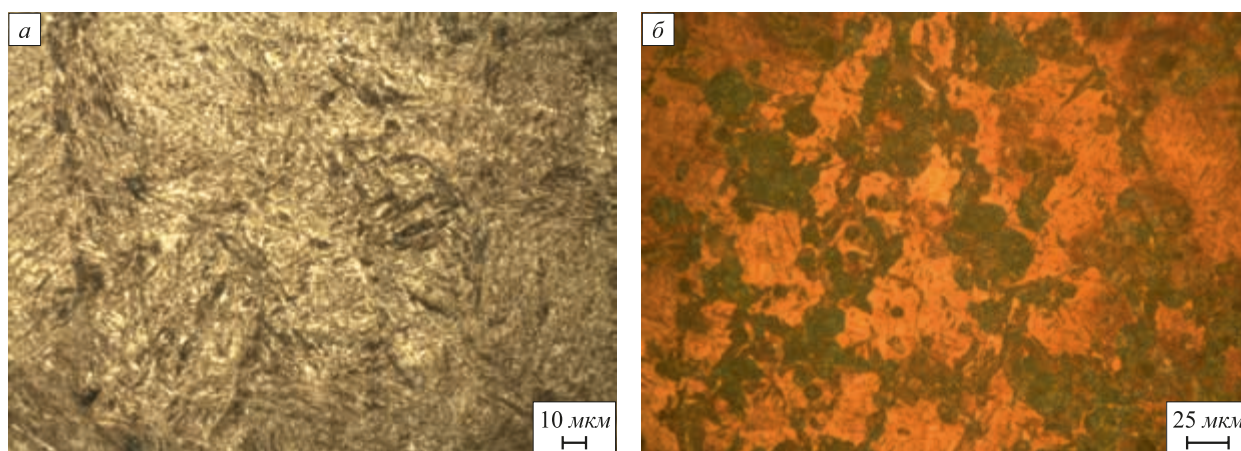


Рис. 5. Микроструктура центральной части шаров диаметром 40 (а) и 60 мм (б)

Fig. 5. Microstructure of the central parts of the balls with a diameter of 40 (a) and 60 mm (b)

туры (наличие флокенов), а для шаров с высокой (57 – 61 HRC) поверхностной твердостью наиболее значимое влияние на ударную стойкость оказывает неоднородная микроструктура металла, которая обуславливает значительный перепад твердости по сечению шаров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Крутилин А.Н., Бестужев Н.И., Бестужев А.Н., Каленкович Д.Н. Мелющие тела. Проблемы. Перспективы // Литье и металлургия. 2009. № 4 (53). С. 26 – 33.
2. Johar R.K., Saravanakumar G., Prasad R.K. Kinetics and sub sieve morphology of ball mill grinding for different grades of Indian

- coals // International Journal of Oil, Gas and Coal Technology. 2018. Vol. 17. No. 4. P. 458 – 471.
3. Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Абеннова М.Б., Куликов В.Д., Кондратьев И.С. Качество мелющих шаров, изготовленных различными методами // Теория и технология металлургического производства. 2015. № 1 (16). С. 78 – 81.
 4. Рахутин М.Г., Бойко П.Ф. Пути совершенствования методов оценки основных характеристик мелющих шаров // Уголь. 2017. № 12. С. 49 – 53.
 5. Shi F., Xie W. A specific energy-based size reduction model for batch grinding ball mill // Minerals Engineering. 2015. Vol. 70. P. 130 – 140.
 6. Chen X.S., Li Q., Fei S.M. Constrained Model Predictive Control in Ball Mill Grinding Process // Powder Technology. 2008. Vol. 186. P. 31 – 39.
 7. Найзабеков А.Б., Мухаметкалиев Б.С., Арбуз А.С., Лежнев С.Н. Снижение расхода стальных мелющих шаров путем улучшения технологии их производства // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2016. № 4 (46). С. 78 – 86.
 8. Филиппова М.В., Климов А.В., Перетягко В.Н. Качество мелющих шаров // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 12. С. 30 – 35.
 9. Umucu Y., Deniz V. The effect of ball type in fine particles grinding on kinetic breakage parameters // Inzynieria Mineralna. 2015. Vol. 16. Issue 1. P. 197 – 203.
 10. Roux J.D.L., Craig, I.K. Requirements for estimating the volume of rocks and balls in a grinding mill // IFAC-PapersOnLine. 2017. Vol. 50. No. 1. P. 1169 – 1174.
 11. Shi F., Xie W. A specific energy-based ball mill model: From batch grinding to continuous operation // Minerals Engineering. 2016. Vol. 86. P. 66 – 74.
 12. Перетягко В.Н., Филиппова М.В., Климов А.С., Котлов Г.С., Федоров А.А. Шаровая заготовка // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 3. С. 17 – 19.
 13. Aldrich C. Consumption of steel grinding media in mills – A review // Minerals Engineering. 2013. Vol. 49. P. 77 – 91.
 14. Bürger R., Bustamante O., Fulla M.R., Rivera I.E. A population balance model of ball wear in grinding mills: An experimental case study // Minerals Engineering. 2018. Vol. 128. P. 288 – 293.
 15. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T., Cyganek Z., Andrietti S., Barbelet M. An innovative method for producing balls from scrap rail heads // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. Vol. 97. No. 1-4. P. 893 – 901.
 16. Kotenok V.I., Podobedov S.I. Energy-efficient design of rolls for ball-rolling mills // Metallurgist. 2001. Vol. 45. No. 9-10. P. 363 – 367.
 17. Перетягко В.Н., Климов А.В., Филиппова М.В. Калибровка валков шаропрокатного стана. Сообщение 1 // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 4. С. 27 – 30.
 18. Tomczak J., Pater Z., Bulzak T. The flat wedge rolling mill for forming balls from heads of scrap railway rails // Archives of Metallurgy and Materials. 2018. Vol. 63. No. 1. P. 5 – 12.
 19. Bai X., Jin Y. Heat treatment of wear resistant steel ball for large ball mill // Jinshu Rechuli/Heat Treatment of Metals. 2017. Vol. 42. No. 5. P. 193 – 196.
 20. Сталинский Д.В., Рудюк А.С., Солёный В.К. Выбор материала и технологий термической обработки мелющих шаров, работающих преимущественно в условиях абразивного износа // Сталь. 2017. № 6. С. 64 – 69.
 21. Lam M.M., Serov A.I., Smyrnov Y.N., Ternavskii A.N., Mukheiev V.V. Production of hard (class V) grinding balls at PJSC “DMPZ” // Steel in Translation. 2017. Vol. 47. No. 5. P. 325 – 329.
 22. Murthy B.R.N. Effects of two stage austempering heat treatment on microstructure and wear rates of ADI balls used in ball mill for grinding of iron ore // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2018. Vol. 13. No. 9. P. 701 – 708.
 23. Chumachenko E.N., Aksenov S.A., Logashina I.V. Mathematical modeling and energy conservation for rolling in passes // Metallurgist. 2010. No. 8. P. 498 – 503.
 24. Филиппова М.В., Темлянец М.В., Перетягко В.Н. Прудкий Е.Е. Математическое моделирование прокатки шаров // Изв. вуз. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 7. С. 516 – 521.
 25. Gubanova N.V., Karelin F.R., Choporov V.F., Yusupov V.S. Study of rolling in helical rolls by mathematical simulation with the Deform 3D software package // Russian Metallurgy (Metally). 2011. No. 3. P. 188 – 193.
 26. Перетягко В.Н., Климов А.С., Филиппова М.В. Калибровка валков для прокатки шара // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. 2012. Вып. 30. С. 44 – 50.
 27. Ефременко В.Г. Металлографический анализ причин разрушения стальных катаных тел для барабанных мельниц // Вестник Приазовского государственного технического университета. 2000. № 9. С. 89 – 91.
 28. Филиппова М.В., Перетягко В.Н., Сметанин С.В. Усилия и напряжения при прокатке шара // Изв. вуз. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 8. С. 587 – 588.
 29. Герасимова Л.П., Ежов А.А., Маресев М.И. Изломы конструкционных сталей: справочное издание. – М.: Металлургия, 1987. – 272 с.

Поступила в редакцию 28 августа 2018 г.

После доработки 11 сентября 2018 г.

Принята к публикации 6 октября 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. VOL. 62. No. 4, pp. 283–289.

INFLUENCE OF MACRO- AND MICROSTRUCTURE OF STEEL GRINDING BALLS ON THEIR IMPACT RESISTANCE

A.A. Umanskii¹, A.V. Golovatenco², T.N. Oskolkova¹, A.S. Simachev¹, A.G. Shchukin¹

¹Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

²OJSC «EVRAZ – WSMP», Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

Abstract. Based on the analysis of the literature and production data, it is shown that the wear resistance of steel grinding balls, which are the main grinding medium for crushing various types of raw materials in the drum type mills, is determined not only by hardness of the surface layer, but also by the quality of their macro- and microstructure.

At the same time, there is a complex nature of dependences of the balls impact resistance on the above mentioned parameters with their simultaneous impact, which determines the relevance of research in this direction. Series of experimental studies was carried out in order to obtain scientifically based dependencies of impact resistance of grinding balls on the quality of their macro- and microstructure. The grinding balls with a diameter of 40 mm, 50 mm and 60 mm produced by OJSC “EVRAZ ZSMK” (Novokuznetsk) and by JSC “Industrial Solutions” (Nizhny Tagil) were used. The research was carried out by metallographic, durometric and fractographic methods of analysis; tests of grinding balls on the impact resistance were performed on the impact drop machine. According to the results of metallographic studies it was determined that the volume-hardened balls are characterized

by a three zone structure. The surface hardened layer with a depth from 1.9 to 7.4 mm is martensite. The transition zone with thickness from 1.0 to 1.7 mm has a structure martensite + troostite. The central zone occupies the entire remaining volume of the ball and has several varieties of microstructure: ferrite + perlite, martensite + troostite + ferrite, martensite + troostite. On the basis of generalization of the obtained experimental data, it was established that at surface hardness of balls within 42 – 52 HRC the quality of macrostructure (presence of flakes) is the parameter determining impact resistance. For balls with high surface hardness (57 – 61 HRC) the most significant impact on impact resistance is provided by non-uniform microstructure of metal, which causes a significant difference in hardness across the balls cross-section.

Keywords: grinding balls, impact resistance, microstructure, flakes, hardness, fractographic studies.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-4-283-289

REFERENCES

- Krutilin A.N., Bestuzhev N.I., Bestuzhev A.N., Kalenkovich D.N. Grinding bodies. Problems. Perspectives. *Lit'e i metallurgiya*. 2009, no. 4 (53), pp. 26–33. (In Russ.).
- Johar R.K., Saravanakumar G., Prasad R.K. Kinetics and sub sieve morphology of ball mill grinding for different grades of Indian coals. *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology*. 2018, vol. 17, no. 4, pp. 458–471.
- Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Abenova M.B., Kulikov V.D., Kondrat'ev I.S. Quality of grinding balls produced by various methods. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. 2015, no. 1 (16), pp. 78–81. (In Russ.).
- Rakhutin M.G., Boiko P.F. Ways to improve assessment methods of the main characteristics of grinding balls. *Ugol'*. 2017, no. 12, pp. 49–52. (In Russ.).
- Shi F., Xie W. A specific energy-based size reduction model for batch grinding ball mill. *Minerals Engineering*. 2015, vol. 70, pp. 130–140.
- Chen X.S., Li Q., Fei S.M. Constrained model predictive control in ball mill grinding process. *Powder Technology*. 2008, vol. 186, pp. 31–39.
- Naizabekov A.B., Mukhametkaliev B.S., Arbuz A.S., Lezhnev S.N. Reducing the consumption of steel grinding balls by improving their production technology. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedenii Chernozem'ya*. 2016, no. 4 (46), pp. 78–86. (In Russ.).
- Filippova M.V., Klimov A.V., Peretyat'ko V.N. Quality of grinding balls. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2015, no. 12, pp. 30–35. (In Russ.).
- Umucu Y., Deniz V. The effect of ball type in fine particles grinding on kinetic breakage parameters. *Inzynieria Mineralna*. 2015, vol. 16, Issue 1, pp. 197–203.
- Roux J.D.L., Craig, I.K. Requirements for estimating the volume of rocks and balls in a grinding mill. *IFAC-PapersOnLine*. 2017, vol. 50, pp. 1169–1174.
- Shi F., Xie W. A specific energy-based ball mill model: From batch grinding to continuous operation. *Minerals Engineering*. 2016, vol. 86, pp. 66–74.
- Peretyat'ko V.N., Filippova M.V., Klimov A.S., Kotlov G.S., Fedorov A.A. Ball billet. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2012, no. 3, pp. 17–19. (In Russ.).
- Aldrich C. Consumption of steel grinding media in mills. *Minerals Engineering*. 2013, vol. 49, pp. 77–91.
- Bürger R., Bustamante O., Fulla M.R., Rivera I.E. A population balance model of ball wear in grinding mills: An experimental case study. *Minerals Engineering*. 2018, vol. 128, pp. 288–293.
- Pater Z., Tomczak J., Bulzak T., Cyganek Z., Andrietti S., Barbelet M. An innovative method for producing balls from scrap rail heads. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018, vol. 97, no. 1-4, pp. 893–901.
- Kotenok V.I., Podobedov S.I. Energy-efficient design of rolls for ball-rolling mills. *Metallurgist*. 2001, vol. 45, no. 9-10, pp. 363–367.
- Peretyat'ko V.N., Klimov A.S., Filippova M.V. Calibration of rolls of a ball-rolling mill. Part 1. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 4, pp. 27–30.
- Tomczak J., Pater Z., Bulzak T. The flat wedge rolling mill for forming balls from heads of scrap railway rails. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2018, vol. 63, no. 1, pp. 5–12.
- Bai X., Jin Y. Heat treatment of wear resistant steel ball for large ball mill. Jinshu Rechuli. *Heat Treatment of Metals*. 2017, vol. 42, no. 5, pp. 193–196.
- Stalinskii D.V., Rudyuk A.S., Solenyi V.K. Production of grinding balls resistant to abrasive wear. *Steel in Translation*. 2017, vol. 47, no. 6, pp. 421–427.
- Lam M.M., Serov A.I., Smyrnov Y.N., Ternavskii A.N., Mykheiev V.V. Production of hard (class V) grinding balls at PJSC “DMPZ”. *Steel in Translation*. 2017, vol. 47, no. 5, pp. 325–329.
- Murthy B.R.N. Effects of two stage austempering heat treatment on microstructure and wear rates of ADI balls used in ball mill for grinding of iron ore. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2018, vol. 9, no. 13, pp. 701–708.
- Chumachenko E.N., Aksenov S.A., Logashina I.V. Mathematical modeling and energy conservation for rolling in passes. *Metallurgist*. 2010, no. 8, pp. 498–503.
- Filippova M.V., Temlyantsev M.V., Peretyat'ko V.N., Prudkii E.E. Mathematical modeling of balls rolling. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 7, pp. 516–521.
- Gubanova N.V., Karelin F.R., Choporov V.F., Yusupov V.S. Study of rolling in helical rolls by mathematical simulation with the Deform 3D software package. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2011, no. 3, pp. 188–193.
- Peretyat'ko V.N., Klimov A.S., Filippova M.V. Rolls designing for balls rolling. *Vestnik gorno-metallurgicheskoi sektsii Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Otdelenie metallurgii*. 2012, vol. 30, pp. 44–50. (In Russ.).
- Efremenko V.G. Metallographic analysis of the causes of destruction of steel rolled bodies for drum mills. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2000, no. 9, pp. 89–91. (In Russ.).
- Filippova M.V., Peretyat'ko V.N., Smetanin S.V. Efforts and stresses during ball rolling. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 8, pp. 587–588. (In Russ.).
- Gerasimova L.P., Ezhov A.A., Maresev M.I. *Izlozheniya konstruktsionnykh stali: spravochnoe izdanie* [Structural steel fractures: Reference edition]. Moscow: Metallurgiya, 1987, 272 p. (In Russ.).

Funding. The work was carried out in SibSIU using the equipment of the Center for Collective Use “Materials Science” within the framework of the basic part of the State task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. 11.6365.2017/8.9.

Information about the authors:

A.A. Umanskii, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Director of the Center for Collective Use “Materials Science” (umanskii@bk.ru)

A.V. Golovatenco, Cand. Sci. (Eng.), Director of Rail Production (Aleksey.Golovatenco@evraz.com)

T.N. Oskolkova, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metal Forming and Metal Science”. OJSC “EVRAZ ZSMK” (oskolkova@kuz.ru)

A.S. Simachev, Cand. Sci. (Eng.), Leading Engineer of the Chair “Metal Forming and Metal Science”. OJSC “EVRAZ ZSMK” (simachev_as@mail.ru)

A.G. Shchukin, Postgraduate of the Chair of Ferrous Metallurgy (schukin_ag@ke.mrsk.ru)

Received August 28, 2018

Revised September 11, 2018

Accepted October 6, 2018