

Исследование характерных дефектов мелющих шаров, изготовленных из отбраковки непрерывнолитых заготовок рельсовых сталей

А. А. УМАНСКИЙ, д-р техн. наук, А. Б. ЮРЬЕВ, д-р техн. наук, А. С. СИМАЧЕВ, канд. техн. наук, Л. В. ДУМОВА
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия (umanskii@bk.ru)

Исследована природа характерных дефектов мелющих шаров из отбраковки рельсовой стали К76Ф, являющихся причинами их неудовлетворительных испытаний на ударную стойкость. Проведен металлографический анализ шаров с использованием светового микроскопа. Определена степень загрязненности стали неметаллическими включениями методами металлографического и рентгеновского анализов. Измерена твердость по сечению шаров. Показано, что дефекты мелющих шаров, снижающие их ударную стойкость, имеют преимущественно сталеплавильное происхождение и вероятность их образования увеличивается с повышением содержания углерода, водорода и серы в стали. Установлено положительное влияние повышения температуры прокатки мелющих шаров из стали К76Ф в интервале 900 – 980 °С на их ударную стойкость, связанное с повышением пластичности рассматриваемой рельсовой стали и, как следствие, с увеличением вероятности заваривания дефектов при горячей деформации.

Ключевые слова: мелющие шары; рельсовая сталь; непрерывнолитые заготовки; дефекты; ударная стойкость; микроструктура.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время массовое распространение получила технология производства мелющих шаров из отбраковки непрерывнолитых заготовок рельсовых сталей, что связано с двумя основными моментами. Во-первых, ужесточение требований к качественным характеристикам железнодорожных рельсов обуславливает повышенный уровень отбраковки исходных заготовок рельсовых сталей. Это приводит к значительным экономическим потерям при использовании таких заготовок в виде металлической шихты для выплавки стали. Во-вторых, мелющие шары в настоящее время являются одним из наиболее высококорентабельных видов проката. При этом наиболее востребованными и экономически эффективными являются мелющие шары повышенной твердости и ударной стойкости [1 – 4].

Таким образом, изготовление мелющих шаров из отбраковки заготовок рельсовых сталей снижает потери на предприятиях, производящих рельсовую продукцию, и, кроме этого, позволяет получить дополнительный объем товарного проката из отбраковки.

В качестве примера массового производства мелющих шаров из отбраковки заготовок рельсовых сталей можно привести опыт ОАО “Турьевский металлургический завод” (ОАО “ТМЗ”). На данном

предприятии, являющемся одним из ведущих производителей мелющих шаров в России, до 50 % шаров прокатывается из отбраковки заготовок рельсовых сталей, поставляемых ПАО “Мечел” [5].

Следует отметить, что в отечественной [6 – 8] и зарубежной [9] металлургии имеется положительный опыт получения качественных мелющих шаров из отбраковки рельсовых сталей. Однако использование такого опыта в современных условиях значительно ограничено в связи с существенными изменениями химического состава и структуры заготовок рельсовых сталей, обусловленными изменениями технологии их выплавки, внепечной обработки и разлива [10 – 13]. Кроме того, необходимо отметить и существенное повышение требований к качественным и эксплуатационным характеристикам мелющих шаров [14 – 17].

Цель настоящей работы — исследование природы характерных дефектов мелющих шаров из отбраковки рельсовых сталей, оказывающих значимое влияние на качественные и эксплуатационные характеристики производимых шаров.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследовали мелющие шары текущего производства ОАО “ТМЗ” из отбраковки заготовок рельсо-

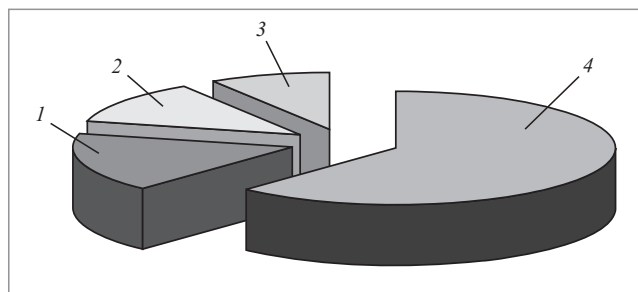


Рис. 1. Распределение характерных дефектов мелющих шаров из отбраковки рельсовой стали по видам:

1 — флокены (17 % от общего количества дефектов); 2 — трещины без скоплений неметаллических включений (12 %); 3 — закалочные микротрещины (9 %); 4 — трещины со скоплениями неметаллических включений (62 %)

вой стали К76Ф, не выдержавшие испытаний на ударную стойкость (копровые испытания).

Структуру характерных дефектов мелющих шаров, не выдержавших копровые испытания, изучали с использованием светового металлографического микроскопа "OLYMPUS GX-51". Анализировали мелющие шары, полученные из 20 партий заготовок рельсовых сталей. Кроме того, на отбракованных мелющих шарах исследовали загрязненность неметаллическими включениями по ГОСТ 1778–70 и оценивали параметры их структуры. Определяли вид неметаллических включений в местах их скоплений методом рентгенофазового анализа (дифрактометр "Shimadzu XRD-6000"). Оценивали неравномерность распределения основных химических элементов (C, Si, Mn, Cr, V, S, P) по сечению шаров методами рентгенофлуоресцентного (спектрометр "Shimadzu XRF-1800") и фотоэлектрического (спектрометр ДФС-71) спектрального анализов. Проводили измерение твердости образцов, отобранных от различных зон мелющих шаров (поверхность, приповерхностная зона, осевая зона) на твердомере ТК-2М.

Для установления происхождения дефектов исследовали влияние химического состава стали и температурного режима прокатки шаров на их ударную стойкость. Испытания на ударную стойкость прово-

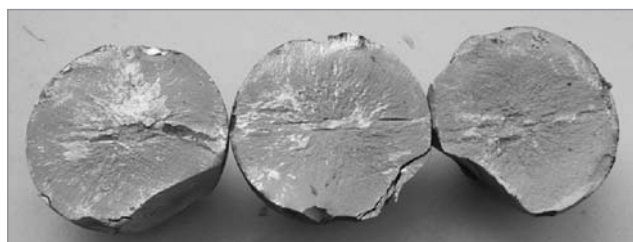


Рис. 3. Флокены в изломе мелющих шаров диаметром 80 мм, не выдержавших испытания на ударную стойкость

дили на копровой установке, расположенной на промышленном шаропрокатном стане ОАО "Гурьевский металлургический завод". В работе применяли стандартную методику множественного регрессионного анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ результатов металлографических исследований показал, что причинами неудовлетворительных испытаний на ударную стойкость шаров из отбраковки рельсовой стали К76Ф являются дефекты четырех основных типов (рис. 1):

1. Внутренние трещины со скоплениями (рис. 2, а) и без скоплений неметаллических включений (рис. 2, б).

2. Флокены (рис. 3), идентифицированные в соответствии с общепринятой классификацией изломов, как "участки на поверхности разрушения в виде светлых пятен, имеющих более крупнокристаллическое строение, чем основной металл" [18].

3. Закалочные трещины, расположенные по границам раздела мартенсита и троостита (ферритно-карбидной смеси с межпластиночным расстоянием $h_{м.п} \leq 0,1$ мкм) (рис. 4).

По полученным данным, неметаллические включения, скопления которых выявлены в местах локализации внутренних трещин, преимущественно представляют собой SiO_2 , MnS и FeS, что совпадает с результатами ранее проведенных исследований дефектов железнодорожных рельсов [19]. При этом в

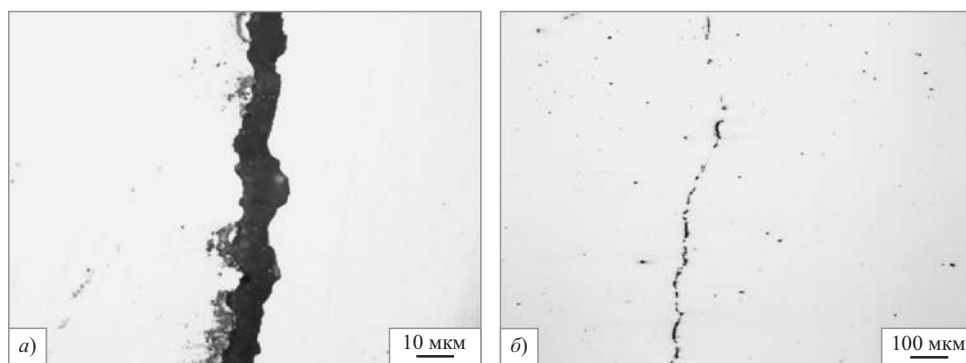


Рис. 2. Внутренние трещины в мелющих шарах со скоплениями неметаллических включений (а) и без включений (б)

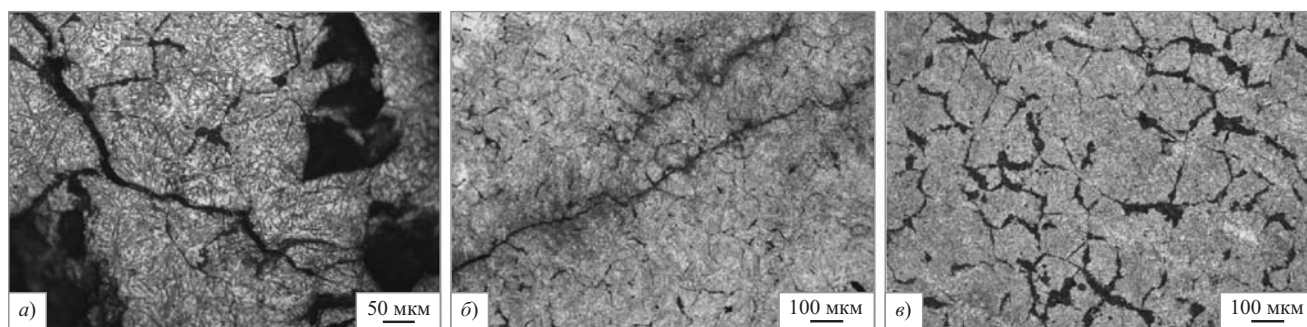


Рис. 4. Микроструктура шара, не выдержавшего испытания на ударную стойкость:

a — микротрещина между двумя разрушенными частями поверхности шара; *б* — начало образования микротрещины по границам зерен (место нахождения ферритно-карбидной составляющей); *в* — центральная зона шара

микроструктуре шаров вне мест расположения указанных дефектов загрязненность неметаллическими включениями незначительная: максимальный балл недеформирующихся силикатов по ГОСТ 1778–70 составил 2а (рис. 5, *a*), сульфидов — 2б (рис. 5, *б*).

Основная причина образования закалочных трещин — формирование двухфазной структуры (мартенсит + ферритно-карбидная смесь) в результате пониженной скорости охлаждения при закалке. Микротрещины по границам раздела фаз (рис. 4, *a*, *б*) являются концентраторами напряжений при ударных нагрузках. Кроме того, значительное различие твердости мартенсита и ферритно-карбидной смеси (в анализируемых шарах диапазон изменения твердости составил 7–8 HRC) также повышает вероятность разрушения изделий при копровых испытаниях. В качестве дополнительного фактора, усугубляющего указанную неравномерность твердости структурных составляющих, является наличие карбидов цементитного типа в сердцевине шаров (рис. 4, *в*). Образование карбидов явилось следствием повышенного до заэвтектоидных значений содержания углерода в осевой зоне шаров вследствие ликвационных процессов (табл. 1). При этом следует отметить, что ликвация остальных химических элементов находится на крайне незначительном уровне.

Исходя из полученных результатов исследований характерных дефектов мелющих шаров наибольшая их доля имеет явно выраженное сталеплавильное происхождение (внутренние трещины со скоплениями неметаллических включений и флокены). Для дополнительного подтверждения полученных данных проведены статистические исследования влияния параметров сталеплавильного и прокатного переделов на отбраковку шаров по результатам копровых испытаний.

Установлено, что повышение содержания углерода, серы и водорода в рельсовой стали К76Ф (в существующем диапазоне их изменения, табл. 2) оказывает отрицательное влияние на ударную стойкость мелющих шаров:

$$B_{\text{копр}} = -12,9 + 11,8[\text{C}] + 3,7[\text{H}] + 102,3[\text{S}], \quad (1)$$

где $B_{\text{копр}}$ — отбраковка шаров по результатам копровых испытаний, %; [C], [S] — содержание углерода и серы в стали соответственно, %; [H] — концентрация водорода в стали, ppm.

Механизм влияния содержания углерода, серы и водорода на ударную стойкость шаров заключается в следующем. Увеличение содержания углерода до заэвтектоидных значений приводит к образованию твердых и хрупких карбидов цементитного ти-

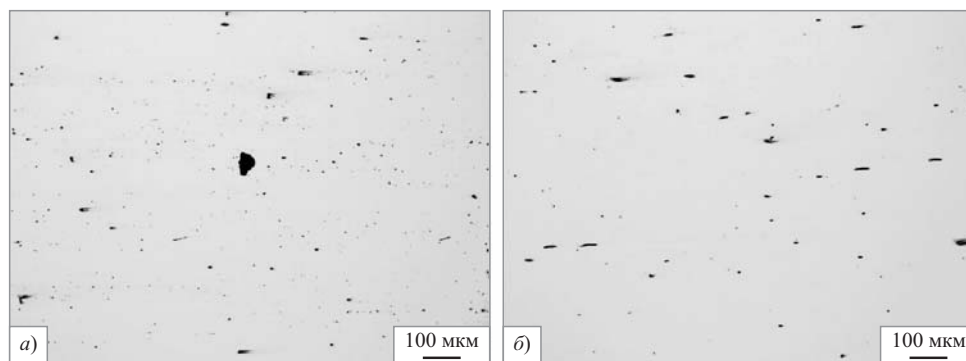


Рис. 5. Неметаллические включения, расположенные вне зоны локализации дефектов:

a — недеформирующиеся силикаты (балл 2а); *б* — сульфиды (балл 2б)

Таблица 1. Распределение содержания основных химических элементов по сечению шаров из рельсовой стали К76Ф

Место отбора пробы	Содержание элементов, % (масс.)											
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Ti	V	Mo	Nb	S	P
Поверхность	0,78	0,26 – 0,27	1,03 – 1,04	0,08	0,04 – 0,05	0,01 – 0,02	0,001 – 0,002	0,085 – 0,086	0,005	0,003 – 0,004	0,016 – 0,017	0,015 – 0,017
1/4 диаметра*	0,82 – 0,83	0,26 – 0,27	1,02 – 1,04	0,08	0,05	0,01	0,001 – 0,003	0,086 – 0,088	0,003 – 0,004	0,003	0,014 – 0,015	0,014 – 0,016
Сердцевина	0,84 – 0,85	0,27	1,04 – 1,05	0,08	0,05	0,01	0,003	0,089 – 0,092	0,005 – 0,006	0,003	0,013 – 0,016	0,015

* Расстояние от поверхности шара.

па (рис. 4, в). Повышенное содержание водорода вызывает образование флокенов, а серы — увеличение концентрации непластичных сульфидов. Относительная степень влияния химического состава рельсовой стали К76Ф на отбраковку шаров по результатам копровых испытаний составила 48 %.

Исследовали также влияние параметров прокатки шаров на их ударную стойкость. Установлено, что повышение температуры прокатки в существующем диапазоне ее изменения (900 – 980 °С) приводит к снижению отбраковки шаров по результатам копровых испытаний:

$$B_{\text{копр}} = 17,9 - 0,015[t], \quad (2)$$

где t — температура начала прокатки шаров, °С.

Механизм влияния повышения температуры прокатки шаров на их ударную стойкость заключается в соответствующем повышении пластичности стали, а следовательно, и в увеличении вероятности заваривания дефектов. По результатам ранее проведенных исследований горячей пластичности рельсовой стали К76Ф в температурном интервале 900 – 1100 °С

ее критерий пластичности возрастает [5]. Относительная степень влияния температуры прокатки на отбраковку шаров по результатам копровых испытаний составила 23 %.

ВЫВОДЫ

1. Характерные дефекты мелющих шаров из отбраковки рельсовой стали К76Ф, являющиеся причиной неудовлетворительных испытаний на ударную стойкость, можно разделить на следующие виды: внутренние трещины со скоплениями и без скоплений неметаллических включений, флокены, закалочные трещины.

2. Показано, что характерные дефекты рассматриваемых мелющих шаров имеют преимущественно сталеплавильное происхождение и определяющее влияние на вероятность их образования оказывает концентрация углерода, водорода и серы в рассматриваемой стали.

3. Установлено значимое влияние повышения температуры прокатки шаров из отбраковки заготовок рельсовой стали К76Ф в интервале 900 – 980 °С

Таблица 2. Статистические характеристики функций и параметра оптимизации для мелющих шаров из рельсовой стали К76Ф

Наименование характеристики	Единицы измерения	Область изменения	Среднее значение	Среднее квадратическое отклонение
Брак по результатам копровых испытаний	%	0 – 15,2	3,8	1,1
Содержание в стали элементов:				
Углерода	%	0,75 – 0,87	0,78	0,09
Водорода	ppm	1,2 – 2,0	1,7	0,3
Серы	%	0,008 – 0,018	0,012	0,003
Фосфора	%	0,011 – 0,020	0,015	0,004
Ванадия	%	0,07 – 0,11	0,09	0,01
Кремния	%	0,28 – 0,41	0,35	0,04
Никеля	%	0,04 – 0,07	0,05	0,01
Хрома	%	0,04 – 0,09	0,07	0,01
Меди	%	0,01 – 0,05	0,03	0,01
Титана	%	0,001 – 0,006	0,003	0,001

на увеличение ударной стойкости шаров за счет повышения вероятности заваривания дефектов при увеличении пластичности стали.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20170, <https://rscf.ru/project/22-29-20170/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. Aldrich C. Consumption of steel grinding media in mills // Minerals Engineering. 2013. V. 49. P. 77 – 91.
3. Lam M. M., Serov A. I., Smyrnov Y. N. et al. Production of hard (class V) grinding balls at PJSC "DMPZ". Steel in Translation. 2017. Vol. 47, No. 5. P. 325 – 329.
4. Camurri C., Carrasco C., Colàs R. Improving the working life of steel grinding balls by optimizing their hardness and tenacity // Materials Science Forum. 2014. V. 783. P. 2260 – 2265.
5. Уманский А. А., Симачев А. С., Думова Л. В. Разработка технологии производства мелющих тел с повышенными эксплуатационными свойствами из отбраковки рельсовых сталей // Черные металлы. 2021. № 5. С. 57 – 62.
6. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T. et al. An innovative method for producing balls from scrap rail heads // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. V. 97, No. 1 – 4. P. 893 – 901.
7. 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. V. 63, No. 1. P. 5 – 12.
8. 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. V. 63, No. 1. P. 5 – 12.
9. Баранов Н. А., Тулунов О. Н. Производство мелющих шаров из рельсовой стали // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2017. Т. 1. С. 96 – 99.
10. Umansky A. A., Kozurev N. A., Boykov D. V., Dumova L. V. Improvement of the extra-furnace rail steel processing on the ladle-furnace unit in order to increase the operational stability of railway rails // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. V. 411(1). P. 012078.
11. Kozurev N. A., Protopopov E. V., Umanskii A. A., Boikov D. V. Improving the reduction and ladle treatment of Electrosteel for rail production // Steel in Translation. 2015. V. 45, No. 10. P. 717 – 722.
12. Shablovskii V. A., Klyuchkin A. V., Kuznetsov E. P. et al. Selecting mixtures for continuous casting of rail steel at OAO EVRAZ ZSMK // Steel in Translation. 2012. V. 42, No. 4. P. 336 – 339.
13. Фейлер С. В., Полевой Е. В., Дементьев В. П. Исследование ликвационных процессов при непрерывной разливке рельсовой стали // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2014. № 2. С. 23 – 25.
14. Рахутин М. Г., Бойко П. Ф. Пути совершенствования методов оценки основных характеристик мелющих шаров // Уголь. 2017. № 12. С. 49 – 51.
15. 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.
16. 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.
17. Utisu Y., Deniz V. The effect of ball type in fine particles grinding on kinetic breakage parameters // Inzynieria Mineralna. 2015. V. 16, Is. 1. P. 197 – 203.
18. Герасимова Л. П., Ежов А. А., Марсеев М. И. Изломы конструкционных сталей: справочное издание. М.: Металлургия, 1987. 272 с.
19. Уманский А. А., Симачев А. С., Головатенко А. В., Думова Л. В. Природа внутренних дефектов железнодорожных рельсов производства АО "ЕВРАЗ ЗСМК", выявляемых при ультразвуковом контроле в потоке стана // МиТОМ. 2022. № 6(804). С. 59 – 64.

Статья поступила в редакцию 25.05.2022 г.

Investigation of typical defects of grinding balls produced from rejected continuously cast rail steel billets

A. A. Umanskii, A. B. Yur'ev, A. S. Simachev, and L. V. Dumova

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

The nature of typical defects of grinding balls from rejected rail steel K76F, which are responsible for unsatisfactory results of tests for impact toughness, are studied. Metallographic analysis of the balls is made with the use of an optical microscope. The degree of contamination of the steel with nonmetallic inclusions is determined by metallographic and x-ray diffraction analyses. The hardness is measured over cross section of the balls. It is shown that the defects lowering the impact toughness of the balls have a steel melting origin and the probability of their formation increases with the content of carbon, hydrogen and sulfur in the steel. Increase of the rolling temperature of grinding balls from steel K76F within 900 – 980°C affects positively their impact toughness due to elevation of the ductility of the rail steel and probable sealing of these defects under hot deformation.

Key words: grinding balls, rail steel, continuously cast billets, defects, impact toughness, microstructure.