

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ
ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ
ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХINNOVATION IN METALLURGICAL
INDUSTRIAL AND LABORATORY EQUIPMENT,
TECHNOLOGIES AND MATERIALS

УДК 621.771.65

DOI 10.17073/0368-0797-2023-2-222-228

Оригинальная статья
Original article

АНАЛИЗ ПРИРОДЫ ПРОИСХОЖДЕНИЯ ХАРАКТЕРНЫХ ДЕФЕКТОВ МЕЛЮЩИХ ШАРОВ ИЗ ОТБРАКОВКИ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ

А. А. Уманский , И. С. Морозов, Е. В. Протопопов,
А. С. Симачев, Л. В. Думова

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

 umanskii@bk.ru

Аннотация. На основании металлографических исследований определены характерные дефекты мелющих шаров, прокатанных из отбраковки непрерывнолитых заготовок рельсовой стали марки К76Ф. Установлена взаимосвязь наличия внутренних дефектов шаров с их ударной стойкостью. Наибольшее влияние на снижение ударной стойкости шаров оказывают дефекты в виде внутренних трещин со скоплениями неметаллических включений в области их локализации и флокены. Такие дефекты являются причиной разрушения шаров при испытаниях на ударную стойкость в 62 и 17 % случаев соответственно. Влияние внутренних трещин без значительных скоплений неметаллических включений и закалочных микротрещин, расположенных по границам раздела фаз, оценивается на уровне 12 и 9 %. Установлены закономерности и механизм влияния химического состава отбраковки заготовок рельсовой стали К76Ф на вероятность разрушения производимых из них шаров при испытаниях на ударную стойкость. Увеличение содержания серы в заготовках рассматриваемой рельсовой стали снижает ударную стойкость производимых из них шаров, так как способствует образованию хрупких сульфидов, которые концентрируются в области расположения внутренних трещин. Повышение содержания водорода в рельсовой стали закономерно способствует увеличению вероятности образованию флокенов, которые значительно уменьшают устойчивость шаров к ударным нагрузкам. Увеличение концентрации углерода в исходных заготовках влияет на повышение вероятности разрушения шаров из стали К76Ф при копровых испытаниях, что объясняется образованием карбидов цементитного типа при достижении содержания углерода, соответствующего заэвтектидной стали. В целом относительная степень влияния химического состава рельсовой стали марки К76Ф на ударную стойкость мелющих шаров составляет 48 %.

Ключевые слова: внутренние дефекты, макроструктура, мелющие шары, ударная стойкость, рельсовая сталь, непрерывнолитые заготовки, металлографические исследования

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект № 22-29-20170 и гранта Кемеровской области – Кузбасса.

Для цитирования: Уманский А.А., Морозов И.С., Протопопов Е.В., Симачев А.С., Думова Л.В. Анализ природы происхождения характерных дефектов мелющих шаров из отбраковки непрерывнолитых заготовок рельсовой стали. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2023;66(2):222–228. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-2-222-228>

OCCURRENCE OF CHARACTERISTIC DEFECTS OF GRINDING BALLS FROM REJECTS OF CONTINUOUSLY CAST BILLETS OF RAIL STEEL

A. A. Umanskii , I. S. Morozov, E. V. Protopopov,
A. S. Simachev, L. V. Dumova

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

 umanskii@bk.ru

Abstract. On the basis of metallographic studies, the authors determined the characteristic defects of grinding balls rolled from the rejects of continuously cast billets of K76F rail steel. Relationship of the presence of internal defects of the balls with their impact resistance was established. Defects

in the form of internal cracks with accumulations of non-metallic inclusions in the area of their localization and flocks have the greatest impact on the reduction of balls impact resistance. Such defects are the cause of balls destruction during impact resistance tests in 62 and 17 % of cases, respectively. The effect of internal cracks without significant accumulations of non-metallic inclusions and quenching microcracks located along the boundaries of the phase interface was estimated at 12 and 9 %. The regularities and mechanism of influence of the rejects chemical composition of K76F rail steel billets on the probability of destruction of the balls produced from them during impact resistance tests were established. An increase in sulfur content in the billets of the studied rail steel reduces impact resistance of the balls produced from them, as it contributes to formation of non-plastic sulfides that concentrate in the area of internal cracks. An increase in hydrogen content in rail steel naturally contributes to an increase in probability of formation of the flocks, which significantly reduce the balls stability to shock loads. An increase in carbon content in the initial billets affects the increase in probability of destruction of K76F steel balls during copra tests. It is explained by formation of cementite-type carbides when carbon content corresponding to the eutectoid steel is reached. In general, the relative degree of influence of the K76F rail steel chemical composition on impact resistance of grinding balls is 48 %.

Keywords: internal defects, macrostructure, grinding balls, impact resistance, rail steel, continuously cast billets, metallographic studies

Acknowledgements: The research was supported the Russian Science Foundation (grant No. 22-29-20170) and the Kemerovo Region – Kuzbass.

For citation: Umanskii A.A., Morozov I.S., Protopopov E.V., Simachev A.S., Dumova L.V. Occurrence of characteristic defects of grinding balls from rejects of continuously cast billets of rail steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(2):222–228.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-2-222-228>

ВВЕДЕНИЕ

Мелющие (помольные) шары используются для подготовки (размола) исходных материалов в различных отраслях промышленности: металлургической, горнорудной, цементной [1–3]. Ключевыми характеристиками, определяющими эффективность работы и срок службы мелющих шаров, являются их твердость (поверхностная и объемная) и ударная стойкость [4–6]. Высокие значения указанных показателей достигаются, в основном, за счет дополнительного легирования исходных сталей хромом [7; 8] и применения термообработки шаров после их прокатки [9–11].

Рядом исследователей [12; 13] ранее установлено определяющее влияние внутренних дефектов шаров на их ударную стойкость. Однако контроль качества макроструктуры шаров не регламентирован в нормативно-технической документации на производство данного вида продукции и, соответственно, не производится. Отсутствие такого контроля шаров и заготовок для их производства в потоке производства, в свою очередь, обуславливает отсутствие обоснованной информации о характерных дефектах, являющихся причинами снижения эксплуатационного ресурса шаров в результате их раскола при ударных нагрузках.

Таким образом, исследования характерных дефектов мелющих шаров во взаимосвязи с их ударной стойкостью являются актуальными.

В настоящей работе в качестве объекта исследований использованы мелющие шары, произведенные ОАО «Гурьевский металлургический завод» («ОАО «ГМЗ») из отбраковки непрерывнолитых заготовок рельсовой стали, поставляемых компанией «Мечел». Следует отметить, что в последние годы переработка указанных заготовок в мелющие шары получила развитие в связи с увеличением количества отбраковки [14–17], в свою очередь обусловленным повышением требований к качеству рельсов [18; 19]. В настоящее время ОАО «ГМЗ» является одним из ведущих производителей мелющих шаров в России

и ежегодно прокатывает 25–40 тыс. т шаров из отбраковки заготовок рельсовой стали К76Ф, что составляет 30–50 % от общего объема выпуска данного вида продукции на предприятии. Результаты исследований природы происхождения дефектов мелющих шаров, произведенных из отбраковки заготовок рельсовых сталей, являются научной базой для повышения их ударной стойкости при массовом производстве, а их использование на практике потенциально обладает значительной экономической эффективностью.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования происхождения дефектов мелющих шаров, произведенных из отбраковки рельсовой стали, проводили методом металлографического анализа с использованием оптического микроскопа OLYMPUS GX-51 и рентгеноструктурного анализа с использованием дифрактометра Shimadzu XRD-6000.

В качестве объектов исследования использовали мелющие шары диаметром 60 мм из рельсовой стали марки К76Ф производства ОАО «Гурьевский металлургический завод», отбракованные по результатам копровых испытаний. Анализировали 20 партий шаров.

Исследовали параметры микроструктуры, ликвацию основных химических элементов и распределение твердости по сечению отбракованных мелющих шаров. Исследования ликвации химических элементов по сечению проводили с использованием спектрального анализа: методом рентгенофлуоресцентного анализа по ГОСТ 28033–89 (спектрометр Shimadzu XRF-1800) и фотоэлектрического спектрального анализа по ГОСТ 18895–97 (спектрометр ДФС-71).

Влияние параметров сталеплавильного передела на вероятность неудовлетворительных результатов копровых испытаний изучали с использованием множественного регрессионного анализа. В качестве объекта исследований использовали случайную выборку из 50 партий шаров диаметром 60 мм.

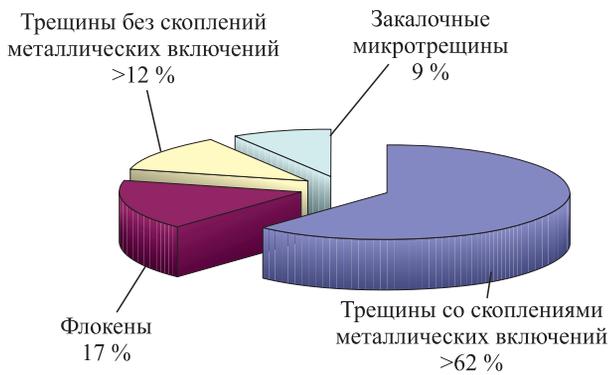


Рис. 1. Распределение дефектов мелющих шаров, произведенных из отбраковки рельсовой стали, по видам

Fig. 1. Distribution of defects of grinding balls produced from rail steel rejects, by type

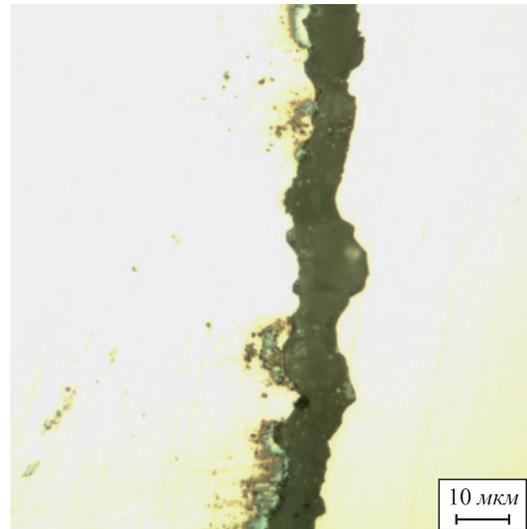


Рис. 2. Внутренняя трещина в мелющем шаре со скоплениями неметаллических включений

Fig. 2. Internal crack in grinding ball with clusters of non-metallic inclusions

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученное распределение дефектов, явившихся причинами разрушения мелющих шаров из рельсовой стали К76Ф при испытаниях на ударную стойкость, по видам представлено на рис. 1. Наибольшую долю составляют трещины со скоплениями неметаллических включений (рис. 2). Неметаллические включения, скопления которых наблюдаются в области локализации дефектов, преимущественно представляют собой сложные оксиды ($Al_2O_3-CaO-MgO$, Al_2O_3-CaO , Al_2O_3-MgO), классифицируемые как непластичные или хрупкоразрушенные (способные вытягиваться в строчки при пластической деформации, но разрушающиеся при достижении определенной степени деформации), а также сульфиды марганца и железа. Основная масса неметаллических оксидных включений образуется в процессе раскисления стали. При этом следует отметить, что согласно существующей технологии производства рельсовых сталей раскисление алюминием не проводят и основным источником его поступления в сталь являются ферросплавы, где алюминий содержится в виде остаточной примеси. Концентрация сульфидных включений, образование

которых преимущественно происходит в процессе кристаллизации стали, напрямую определяется содержанием серы. При этом выраженное негативное влияние на качество проката оказывают сульфиды железа, уменьшения концентрации которых можно достичь повышением содержания марганца в стали. Вторым по распространенности видом дефекта являются флокены, идентифицированные в соответствии с общепринятой классификацией изломов [20]: на поверхности разрушения имеются участки в виде светлых пятен, имеющие более крупнокристаллическое строение по отношению к основному металлу (рис. 3).

Трещины без скоплений неметаллических включений (рис. 4) в области их локализации явились причиной неудовлетворительных испытаний мелющих шаров на ударную стойкость в 12 % случаев.

На основе вышесказанного можно констатировать, что дефекты, определяющие ударную стойкость мелю-



Рис. 3. Флокены в изломе шаров после испытаний на ударную стойкость

Fig. 3. Flakes in the balls fracture after impact resistance tests

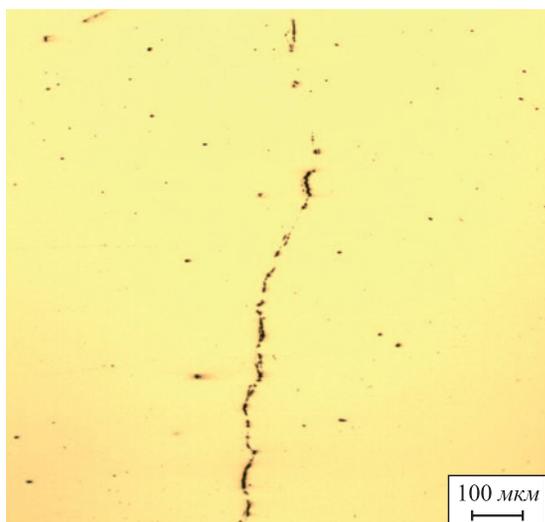


Рис. 4. Внутренняя трещина в шаре, расколовшемся после 24 ударов

Fig. 4. Internal crack in the ball splitted up after 24 impacts

щих шаров из рельсовой стали К76Ф, имеют преимущественно сталеплавильное происхождение.

Для подтверждения полученных результатов дополнительно проведены статистические исследования влияния химического состава заготовок на отбраковку шаров по результатам копровых испытаний. Установлено, что повышения содержаний серы, водорода и углерода в стали в существующем диапазоне их концентрации (табл. 1) оказывают значимое влияние на увеличение отбраковки шаров при испытаниях на ударную стойкость:

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

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

В соответствии с вышеприведенными результатами металлографических исследований влияние концентрации водорода в стали на вероятность разрушения шаров при копровых испытаниях связано с образованием флокенов, выявленных в изломе ряда расколовшихся шаров, а влияние серы – с образованием непластичных сульфидов.

В структуре оставшихся 9 % шаров, не выдержавших испытания на ударную стойкость, выявлены микротрещины по границам раздела фаз мартенсита и троостита (рис. 5, а, б). Наличие троостита свидетельствует об отклонении от оптимального режима термообработки, а именно, о пониженной скорости охлаждения при закалке. Полученная двухфазная структура является дефектной по причине значительного различия механических свойств мартенсита и троостита, что повышает вероятность разрушения изделий при ударных нагрузках. Фактически диапазон изменения твердости в сердцевине шаров со структурой мартенсит + троостит составляет 7 – 8 HRC, что подтверждает вышеприведенный тезис о неравномерности распределения механических свойств. Следует отметить, что указанная неравномерность свойств усугубляется присутствием в микроструктуре сердцевины таких шаров помимо мартенсита и троостита карбидов цементитного типа (рис. 5, в). Наличие карбидов свидетельствует о повышенном (до заэвтектоидного состава) содержании углерода и обусловлено

Т а б л и ц а 1

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

Table 1. Statistical characteristics of functions and optimization parameter for grinding balls made of K76F rail steel

Наименование	Единицы измерения	Область изменения	Среднее значение	Среднее квадратическое отклонение
Брак по результатам копровых испытаний	%	0 – 15,2	3,8	1,1
Содержание в стали				
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

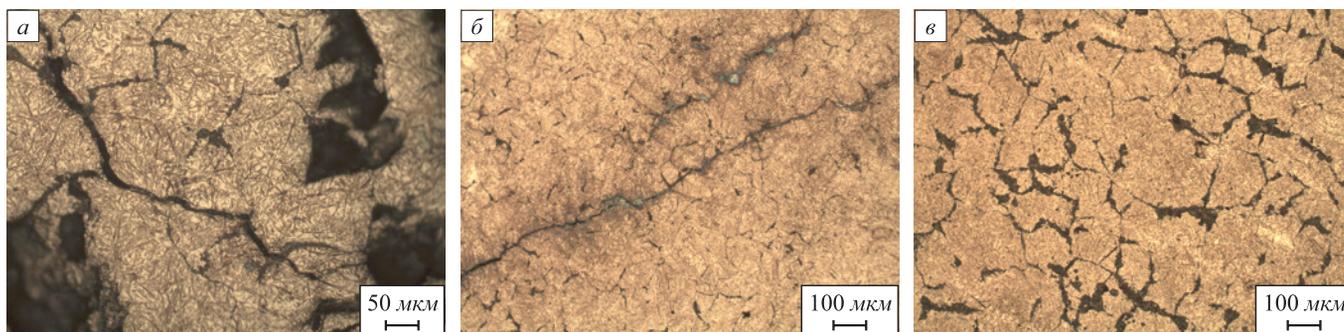


Рис. 5. Микроструктура шара, расколовшегося после 29 ударов:
а – микротрещина между двумя разрушенными частями поверхности шара;
б – образование микротрещины по границам зерен (место нахождения трооститной составляющей);
в – центральная зона шара

Fig. 5. Microstructure of the ball splitted up after 29 impacts:
a – a microcrack between two destroyed parts of the ball surface;
б – formation of a microcrack along the grain boundaries (location of the troostite component);
в – central zone of the ball

значительной его ликвацией (табл. 2). При этом следует отметить, что ликвация остальных химических элементов крайне незначительна.

Таким образом, отрицательное влияние повышения содержания углерода на ударную стойкость шаров обусловлено образованием карбидов цементитного типа при достижении содержания углерода, соответствующего заэвтектоидной стали.

Относительная суммарная степень влияния концентрации вышеприведенных химических элементов на отбраковку шаров по результатам копровых испытаний составила 48 %. Исходя из вышеизложенных результа-

тов, оставшиеся 52 % относительного влияния на ударную стойкость шаров связаны с параметрами технологии раскисления стали и параметрами термообработки шаров после их прокатки. Эффективным методом уменьшения концентрации глиноземистых оксидных включений является применение ферросплавов новых марок с пониженным содержанием алюминия. Это является актуальным, так как в ряде распространенных видов ферросплавов содержание алюминия может достигать значительной величины: в ферросилиции различных марок допустимое содержание алюминия составляет 1,0 – 3,5 %. Также снижению концентрации

Т а б л и ц а 2

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

Table 2. Distribution of content of the main chemical elements over cross section of K76F rail steel balls

Количество элементов, % (по массе)	Место отбора пробы			
	Поверхность	Расстояние 1/4 диаметра от поверхности	Сердцевина	Требования ГОСТ Р 51685 – 2013
C	0,78	0,82 – 0,83	0,84 – 0,85	0,71 – 0,82*
Si	0,26 – 0,27	0,26 – 0,27	0,27	0,25 – 0,60
Mn	1,03 – 1,04	1,02 – 1,04	1,04 – 1,05	0,75 – 1,25
Cr	0,08	0,08	0,08	<0,20
Ni	0,04 – 0,05	0,05	0,05	<0,20
Cu	0,01 – 0,02	0,01	0,01	<0,20
Ti	0,001 – 0,002	0,001 – 0,003	0,003	<0,010
V	0,085 – 0,086	0,086 – 0,088	0,089 – 0,092	0,03 – 0,15
Mo	0,005	0,003 – 0,004	0,005 – 0,006	–
Nb	0,003 – 0,004	0,003	0,003	–
S	0,016 – 0,017	0,014 – 0,015	0,013 – 0,016	<0,020
P	0,015 – 0,017	0,014 – 0,016	0,015	<0,020

* допустимые отклонения составляют ±0,02 %.

неметаллических включений закономерно способствует уменьшению окисленности стали на выпуске из плавильных агрегатов, что достигается за счет совершенствования режимов продувки. Касательно влияния параметров термообработки на образование дефектов мелющих шаров можно отметить, что эффективным направлением по снижению вероятности появления закалочных трещин является применение закалочных сред с высокой охлаждающей способностью.

Выводы

На основании комплекса металлографических и статистических исследований определены характерные дефекты, наличие которых обуславливает снижение ударной стойкости мелющих шаров из отбраковки рельсовой стали марки К76Ф. Анализ природы данных дефектов показал, что они имеют преимущественно сталеплавленное происхождение (внутренние трещины со скоплениями неметаллических включений, флокены) и их образование находится в прямой взаимосвязи с содержанием серы, водорода и углерода в стали. Относительная степень влияния вышеуказанных химических элементов в рельсовой стали К76Ф в фактическом диапазоне изменения их концентрации на ударную стойкость мелющих шаров составила 48 %. Также выявлено значительное влияние на устойчивость мелющих шаров к ударным нагрузкам параметров их термообработки, что подтверждено наличием закалочных трещин в изломе 9 % шаров, не выдержавших копровые испытания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Рахутин М.Г., Бойко П.Ф. Пути совершенствования методов оценки основных характеристик мелющих шаров. *Уголь*. 2017;(12):49–52. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2017-12-49-52>
Rakhutin M.G., Boiko P.F. Ways to improve assessment methods of the main characteristics of grinding balls. *Ugol'*. 2017;(12):49–52. (In Russ.). <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2017-12-49-52>
- Крутилин А.Н., Бестужев Н.И., Бестужев А.Н., Каленкович Д.Н. Мелющие тела. Проблемы. Перспективы. *Литье и металлургия*. 2009;(4(53)):26–33.
Krutilin A.N., Bestuzhev N.I., Bestuzhev A.N., Kalenkovich D.N. Grinding bodies. Problems. Prospective. *Lit'e i metallurgiya*. 2009;(4(53)):26–33. (In Russ.).
- Aldrich C. Consumption of steel grinding media in mills – A review. *Minerals Engineering*. 2013;49:77–91. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.04.023>
- 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)):78–86.
Naizabekov A.B., Mukhametkaliev B.S., Arbuz A.S., Lezhnev S.N. Reduction of consumption of steel grinding balls by improving their production technology. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedenii Chernozem'ya*. 2016;(4(46)):78–86. (In Russ.).
- 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;47(5):325–329. <https://doi.org/10.3103/S0967091217050072>
- Umucu Y., Deniz V. The effect of ball type in fine particles grinding on kinetic breakage parameters. *Inzynieria Mineralna*. 2015;16(1):197–203.
- 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):64–69.
Stalinskii D.V., Rudyuk A.S., Solenyi V.K. Choice of material and technologies for heat treatment of grinding balls operating mainly in conditions of abrasive wear. *Stal'*. 2017;(6):64–69. (In Russ.).
- Bai X., Jin Y. Heat treatment of wear-resistant steel ball for large ball mills. *Heat Treatment of Metals*. 2017;42(5):193–196. <https://doi.org/10.13251/j.issn.0254-6051.2017.05.040>
- Arlazarov A., Bouaziz O., Masse J.P., Kegel F. Characterization and modeling of mechanical behavior of quenching and partitioning steels. *Materials Science and Engineering: A*. 2015; 620:293–300. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.10.034>
- Zhang J., Ding H., Misra R.D.K., Wang C. Enhanced stability of retained austenite and consequent work hardening rate through pre-quenching prior to quenching and partitioning in a Q-P microalloyed steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2014; 611:252–256. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.05.074>
- Camurri C., Carrasco C., Colàs R. Improving the working life of steel grinding balls by optimizing their hardness and tenacity. *Materials Science Forum*. 2014;783–786:2260–2265. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.783-786.2260>
- Ефременко В.Г. Металлографический анализ причин разрушения стальных катаных тел для барабанных мельниц. *Вестник Приазовского государственного технического университета*. 2000;(9):89–91.
Efremenko V.G. Metallographic analysis of causes of destruction of rolled steel bodies for drum mills. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2000;(9):89–91. (In Russ.).
- Уманский А.А., Головатенко А.В., Осколкова Т.Н., Симачев А.С., Шукин А.Г. Исследование влияния макро- и микроструктуры стальных помольных шаров на их ударную стойкость. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2019;62(4):283–289. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-4-283-289>
Umanskii A.A., Golovatenko A.V., Oskolkova T.N., Simachev A.S., Shchukin A.G. Influence of macro- and microstructure of steel grinding balls on their impact resistance. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019;62(4):283–289. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-4-283-289>
- 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;97(1-4):893–901. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2007-9>
- 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;63(1):5–12. <https://doi.org/10.24425/118901>
- Pater Z., Tomczak J., Bulzak T. A cross wedge rolling process for forming 70 mm diameter balls from heads of scrap

railway rails. *Procedia Manufacturing*. 2017;11:466–473. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.137>

17. Баранов Н.А., Тулупов О.Н. Производство мелющих шаров из рельсовой стали. *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования*. 2017;(1) 96–99.

Baranov N.A., Tulupov O.N. Production of grinding balls from rail steel. *Aktual'nye problemy sovremennoi nauki, tekhniki i obrazovaniya*. 2017;(1):96–99. (In Russ.).

18. Головатенко А.В., Волков К.В., Александров И.В., Кузнецов Е.П., Дорوفеев В.В., Сапелкин О.И. Ввод в эксплуатацию универсального рельсобалочного стана и освоение технологии производства рельсов на современном оборудовании в рельсобалочном цехе ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК». *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2014;6(1374):32–38.

Golovatenko A.V., Volkov K.V., Aleksandrov I.V., Kuznetsov E.P., Dorofeev V.V., Sapelkin O.I. Commissioning of universal rail-and-beam mill and mastering the technology of rail production on modern equipment in the rail-and-beam workshop of JSC “EVRAZ ZSMK”. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2014;6(1374):32–38. (In Russ.).

19. Shaburov D.V., Popov A.E., Zagumenov O.V. Rail production on a universal mill. *Steel in Translation*. 2016;46(7): 503–504. <https://doi.org/10.3103/S0967091216070111>

20. Герасимова Л.П., Ежов А.А., Маресев М.И. *Изломы конструкционных сталей: справочник*. М.: Металлургия; 1987:272.

Gerasimova L.P., Ezhov A.A., Maresev M.I. *Structural Steel Fractures: Handbook*. Moscow: Metallurgiya; 1987:272. (In Russ.).

Сведения об авторах

Александр Александрович Уманский, д.т.н., доцент кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0003-4403-9006

E-mail: umanskii@bk.ru

Иван Сергеевич Морозов, соискатель степени к.т.н. кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: ismorozov23@mail.ru

Евгений Валентинович Протопопов, д.т.н., профессор, профессор кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0002-7554-2168

E-mail: protopopov@sibsiu.ru

Артем Сергеевич Симачев, к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением и металлостроение. ЕВРАЗ ЗСМК», Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0002-9712-3757

E-mail: simachev_as@mail.ru

Любовь Валерьевна Думова, соискатель степени к.т.н. кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: doumova@bk.ru

Information about the Authors

Aleksandr A. Umanskii, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0003-4403-9006

E-mail: umanskii@bk.ru

Ivan S. Morozov, Candidates for a Degree of Cand. Sci. (Eng.) of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University

E-mail: ismorozov23@mail.ru

Evgenii V. Protopopov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-7554-2168

E-mail: protopopov@sibsiu.ru

Artem S. Simachev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Metal Forming and Metal Science. “EVRAZ ZSMK”, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-9712-3757

E-mail: simachev_as@mail.ru

Lyubov' V. Dumova, Candidates for a Degree of Cand. Sci. (Eng.) of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University

E-mail: doumova@bk.ru

Вклад авторов

А. А. Уманский – формирование плана проведения исследований; обобщение результатов металлографических и статистических исследований; формулирование общих выводов.

И. С. Морозов – проведение статистических исследований влияния химического состава рельсовой стали на отбраковку шаров по результатам копровых испытаний.

Е. В. Протопопов – научное обоснование закономерностей влияния химического состава рельсовой стали на образование дефектов мелющих шаров; анализ полученных результатов.

А. С. Симачев – проведение металлографических исследований характерных дефектов и изломов мелющих шаров.

Л. В. Думова – проведение аналитического обзора по тематике исследований; оформление графических материалов и статьи.

Contribution of the Authors

A. A. Umanskii – formation of research plan; generalization of the results of metallographic and statistical studies; formulation of general conclusions.

I. S. Morozov – conducting statistical studies on influence of rail steel chemical composition on balls rejection based on the results of copra tests.

E. V. Protopopov – scientific substantiation of regularities of influence of the rail steel chemical composition on formation of defects in grinding balls; analysis of the research results.

A. S. Simachev – conducting metallographic studies on characteristic defects and fractures of grinding balls.

L. V. Dumova – conducting analytical review on the subject of research; design of graphic materials and text.

Поступила в редакцию 26.05.2022

После доработки 29.08.2022

Принята к публикации 14.12.2022

Received 26.05.2022

Revised 29.08.2022

Accepted 14.12.2022