

Оригинальная статья

УДК 621.771.65

DOI: 10.57070/2304-4497-2022-4(42)-54-60

**ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ПРОИЗВОДСТВА МЕЛЮЩИХ ШАРОВ ИЗ ОТБРАКОВКИ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ
НА ИХ УДАРНУЮ СТОЙКОСТЬ**

© 2022 г. А. А. Уманский, А.С. Симачев, Л. В. Думова, С. О. Сафонов

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

Аннотация. На основании проведенных исследований определен перечень технологических параметров сталеплавильного и прокатного передела, оказывающих значимое влияние на ударную стойкость мелющих шаров из отбраковки рельсовой стали марки К76Ф в условиях ОАО «Гурьевский металлургический завод». С использованием стандартных методик статистического и металлографического анализов установлена степень и природа влияния указанных параметров на отбраковку мелющих шаров по результатам копровых испытаний. Определено, что повышение содержания углерода, водорода и серы в стали приводит к увеличению отбраковки мелющих шаров по результатам испытаний на ударную стойкость. При этом влияние углерода связано с формированием карбидов цементитного типа при повышении содержания углерода до заэвтектоидных значений, влияние водорода связано с образованием флокенов, а влияние серы – с образованием непластичных сульфидов. По прокатному переделу установлено значимое влияние повышения температуры прокатки шаров на увеличение их ударной стойкости, обусловленное ростом пластичности стали марки К76Ф в фактическом температурном интервале прокатки (повышение вероятности заваривания дефектов в процессе деформации). Определено, что суммарная относительная степень влияния параметров сталеплавильного и прокатного переделов на отбраковку шаров при испытаниях на ударную стойкость составляет 71 %, оставшиеся 29 % относятся к влиянию параметров термической обработки шаров, что подтверждено результатами металлографических исследований (в изломе шаров выявлены закалочные трещины).

Ключевые слова: мелющие шары, рельсовая сталь, ударная стойкость, химический состав, микроструктура, ликвация

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

Для цитирования: Уманский А.А., Симачев А.С., Думова Л.В., Сафонов С.О. Исследования влияния технологических параметров производства мелющих шаров из отбраковки рельсовой стали на их ударную стойкость // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 4 (42). С. 54 – 60. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-54-60](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-54-60)

**STUDIES OF THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE
PRODUCTION OF GRINDING BALLS FROM THE REJECTION OF RAIL STEEL ON
THEIR IMPACT RESISTANCE**

© 2022 A. A. Umanskii, A. S. Simachev, L. V. Dumova, S. O. Safonov

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

Abstract. Based on the conducted research, a list of technological parameters of steelmaking and rolling processing that have a significant impact on the impact resistance of grinding balls from the rejection of K76F grade rail steel in the conditions of JSC "Guryev Metallurgical Plant" has been determined. Using standard

methods of statistical and metallographic analyses, the degree and nature of the influence of these parameters on the rejection of grinding balls based on the results of copra tests has been established. It is determined that an increase in the content of carbon, hydrogen and sulfur in steel leads to an increase in the rejection of grinding balls according to the results of impact resistance tests. At the same time, the influence of carbon is associated with the formation of cementite-type carbides when the carbon content increases to over-eutectoid values, the influence of hydrogen is associated with the formation of floccenes, and the influence of sulfur is associated with the formation of non-plastic sulfides. According to the rolling conversion, a significant effect of an increase in the temperature of rolling balls on an increase in their impact resistance was established, due to an increase in the plasticity of K76F steel in the actual rolling temperature range (an increase in the probability of defects brewing during deformation). It is determined that the total relative degree of influence of the parameters of steelmaking and rolling processing on the rejection of balls during impact resistance tests is 71%, the remaining 29% relate to the influence of the parameters of the heat treatment of balls, which is confirmed by the results of metallographic studies (quenching cracks were detected in the fracture of the balls).

Keywords: grinding balls, rail steel, impact resistance, chemical composition, microstructure, liquation

Financing. The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 22-29-20170, <https://rscf.ru/project/22-29>, at the expense of a grant from the Kemerovo region – Kuzbass.

For citation: Umanskii A.A., Simachev A.S., Dumova L.V., Safonov S.O. Studies of the influence of technological parameters of the production of grinding balls from the rejection of rail steel on their impact resistance. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022, no. 4 (42), pp. 54 – 60. (In Russ.). [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-54-60](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-54-60)

Введение

В настоящее время одним из наиболее востребованных и высокорентабельных видов прокатной продукции являются мелющие шары повышенной твердости и ударной стойкости [1 – 6].

Поверхностная твердость мелющих шаров традиционно являлась показателем, регламентируемым в ГОСТах на производство рассматриваемого вида продукции, поскольку именно от поверхностной твердости зависит эффективность размола материалов. В действующей редакции стандарта на производство шаров (ГОСТ 7524 – 2015) в зависимости от этого показателя шары подразделяются на пять групп (табл. 1). При этом для шаров повышенных групп твердости помимо поверхностной твердости регламентируется объемная твердость. Это обусловлено отрицательным влиянием значительного перепада твердости по сечению шаров на их ударную стойкость [7 – 9].

Повышенная твердость шаров достигается за счет производства шаров из среднеуглеродистой

легированной стали и термической обработки шаров после прокатки. При этом термическая обработка включает в себя закалку с прокатного нагрева с последующим самоотпуском на воздухе или закалку (с прокатного или отдельного нагревов) с последующим низким отпуском [10, 11]. В работе [12] имеются сведения об опытно-промышленном опробовании режимов ступенчатой закалки при производстве мелющих шаров.

Необходимо отметить, что в ГОСТ 7524 – 2015 химический состав стали для производства шаров не регламентирован в узких пределах. Для различных групп твердости ограничено только минимально допустимое содержание углерода и минимальное значение углеродного эквивалента $\left(C_{\text{экв}} = C + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Si}}{24} + \frac{\text{Cr}}{5} + \frac{\text{Ni}}{40} + \frac{\text{Cu}}{14} + \frac{\text{V}}{14} \right)$ (табл. 2). Это создает предпосылки для производства шаров из отбраковки заготовок различных марок сталей, в том числе из рельсовых сталей [13 – 16].

Т а б л и ц а 1

Распределение шаров по группам твердости по ГОСТ 7524 – 2015
Distribution of balls by hardness groups according to GOST 7524 – 2015

Диаметр шаров, мм	Значение твердости (HRC) не менее							
	на поверхности				на глубине 0,5 радиуса		на поверхности	объемная
	Группа твердости							
	1	2	3	4		5		
15 – 45	45	49	55	55	45	61	57	
50 – 70	43	48	53	53	43	60	53	
80 – 100	39	42	52	52	40	58	48	
110 – 120	35	38	50	50	35	56	43	

Требования ГОСТ 7524 – 2015 к химическому составу стали для производства мелющих шаров
Requirements of GOST 7524–2015 for the chemical composition of steel for the production
of grinding balls

Диаметр шаров, мм	Группа твердости	Содержание углерода, не менее	Углеродный эквивалент, не менее
15 – 55	1, 2	0,4	0,50
	3	0,6	0,70
	4, 5		0,75
60 – 70	1, 2	0,5	0,70
	3, 4	0,6	0,75
	5		0,80
80 – 120	1, 2	0,5	0,70
	3, 4	0,6	0,75
	5		0,85

В отличие от твердости и химического состава ударная стойкость мелющих шаров в ГОСТ 7524 – 2015 не регламентирована. В стандарте имеется указание, что по согласованию между изготовителем и потребителем шары 4 и 5 групп твердости могут поставляться с контролем ударостойкости. При этом контроль ударостойкости проводят по методике изготовителя. Однако, поскольку этот показатель оказывает значительное влияние на показатели качества материалов после измельчения (расколотые мелющие шары смешиваются с основным материалом, что снижает его качество) и технико-экономические показатели размола (пониженная ударная стойкость шаров приводит к их повышенному удельному расходу), то ударную стойкость, как правило, регламентируют в заводской документации на изготовление мелющих шаров (технические условия (ТУ), стандарт организации (СТО)).

Опыт отечественных и зарубежных металлургических предприятий свидетельствует о том [17 – 19], что производство мелющих шаров, обладающих одновременно повышенной твердостью и ударной стойкостью, вызывает объективные трудности. Этот факт связан с тем, что на ударную стойкость шаров большое влияние (помимо химического состава и режимов термической обработки) оказывают такие параметры, как качество макро- и микроструктуры шаров (наличие поверхностных и внутренних дефектов, загрязненность неметаллическими включениями).

В настоящей работе представлены результаты исследований влияния комплекса технологических параметров сталеплавильного и прокатного переделов на ударостойкость шаров производства ОАО «Гурьевский металлургический завод» из отбраковки рельсовых сталей.

Методика исследований

В качестве объектов исследований использовали не выдержавшие испытания на ударную стойкость (копровые испытания) мелющие шары диаметром 60 мм, произведенные на ОАО «Гурьевский металлургический завод» из отбраковки рельсовой стали марки К76Ф.

На первом этапе провели статистические исследования технологических параметров на отбраковку шаров по результатам копровых испытаний. С использованием методики множественного регрессионного анализа исследовали влияние химического состава стали и температуры прокатки на отбраковку мелющих шаров при испытаниях на ударную стойкость. В качестве базы для анализа использовали 50 партий шаров из рельсовой стали марки К76Ф. Диапазон изменения рассматриваемых технологических факторов (функций) и параметра оптимизации, а также их статистические характеристики приведены в табл. 3.

На втором этапе провели исследования природы характерных дефектов мелющих шаров, расколовшихся при копровых испытаниях. В качестве объекта анализа использовали шары 20 партий, прокатанных из отбраковки рельсовой стали марки К76Ф. Металлографические исследования проводили с использованием оптического микроскопа OLYMPUS GX-51, исследования ликвации химических элементов по сечению шаров проводили с использованием спектрометров Shimadzu XRF-1800 и ДФС-71.

Результаты исследований и их обсуждение

По полученным данным большое влияние на снижение ударной стойкости мелющих шаров из отбраковки рельсовой стали марки К76Ф оказывает повышение содержания углерода, водорода и серы в рассматриваемых пределах:

Т а б л и ц а 3

Статистические характеристики функций и параметра оптимизации для мелющих шаров из рельсовой стали марки К76Ф
Statistical characteristics of functions and optimization parameter for grinding balls made of K76F grade rail steel

Характеристика	Значение характеристики		
	область изменения	среднее значение	среднее квадратическое отклонение
Брак по результатам копровых испытаний, %	0 – 15,2	3,8	1,1
Содержание углерода в стали, %	0,75 – 0,87	0,78	0,09
Содержание водорода в стали, ppm	1,2 – 2,0	1,7	0,3
Содержание серы в стали, %	0,008 – 0,018	0,012	0,003
Содержание фосфора в стали, %	0,011 – 0,020	0,015	0,004
Содержание ванадия в стали, %	0,07 – 0,11	0,09	0,01
Содержание кремния в стали, %	0,28 – 0,41	0,35	0,04
Содержание никеля в стали, %	0,04 – 0,07	0,05	0,01
Содержание хрома в стали, %	0,04 – 0,09	0,07	0,01
Содержание меди в стали, %	0,01 – 0,05	0,03	0,01
Содержание титана в стали, %	0,001 – 0,006	0,003	0,001
Температура прокатки, °С	900 – 980	950	75

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

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

Влияние увеличения содержания углерода в стали на повышение отбраковки шаров по результатам копровых испытаний обусловлено образованием карбидов цементитного типа при достижении содержания углерода, соответствующего заэвтектоидной стали. При проведении металлографических исследований установлено, что в сердцевине ряда шаров присутствуют карбиды цементитного типа (рис. 1).

Из результатов химического анализа видно, что при содержании углерода в поверхностном

слое на уровне 0,78 % в сердцевине концентрация этого элемента может достигать до 0,85 %.

Влияние роста содержания водорода в стали марки К76Ф на уменьшение ударной стойкости мелющих шаров связано с образованием флокенов, что подтверждается наличием дефектов в изломе ряда расколовшихся шаров (рис. 2).

Влияние увеличения содержания серы в рассматриваемой рельсовой стали на повышение отбраковки шаров при испытаниях на ударную стойкость обусловлено образованием скоплений непластичных сульфидов.

Суммарная относительная степень влияния химического состава рельсовой стали марки К76Ф на отбраковку шаров при копровых испытаниях составила 48 %.

Согласно полученным результатам установлено значительное влияние повышения температуры прокатки шаров из стали марки К76Ф (в рассматриваемом интервале изменения параметра) на увеличение их ударной стойкости (снижение отбраковки при копровых испытаниях):

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

где t – температура начала прокатки шаров, °С.

Влияние температуры прокатки шаров на их ударную стойкость связано с повышением пластичности стали марки К76Ф при увеличении температуры деформации в рассматриваемом интервале. По результатам ранее проведенных исследований [20] пластичность рассматриваемой рельсовой стали повышается при увеличении температуры деформации от 900 до 1150 °С. Рост пластичности приводит к увеличению веро-

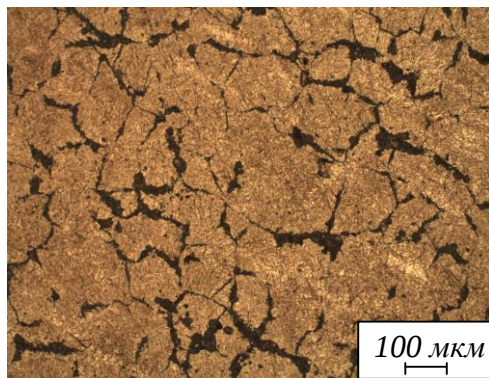


Рис. 1. Центральная зона шара из стали марки К76Ф, не выдержавшего испытания на ударную стойкость
 Fig. 1. The central zone of the ball made of K76F steel, which did not pass the impact resistance test



Рис. 2. Флокены в изломе мелющих шаров из стали марки К76Ф
Fig. 2. Flocks in the fracture of grinding balls made of steel grade K76F

ятности заваривания внутренних трещин без скоплений неметаллических включений (рис. 3), переходящих с исходных заготовок. Относительная степень влияния температуры прокатки шаров на их отбраковку при испытаниях на ударную стойкость составила 23 %.

Обобщая полученные результаты, можно констатировать, что суммарная относительная степень влияния параметров сталеплавильного и прокатного переделов на отбраковку шаров при копровых испытаниях составила 71 %. Оставшиеся 29 % необъясненной вариации относятся к влиянию параметров, не рассмотренных при проведении анализа, для которых отсутствует инструментальная фиксация в потоке производства. Исходя из результатов металлографических исследований, согласно которым в расколовшихся шарах обнаружены закалочные трещины по границам раздела фаз (рис. 4). К ним относятся режимы термической обработки (скорость охлаждения при закалке, температура охлаждающей среды).

Выводы

На основании комплекса статистических и металлографических исследований установлен характер и степень влияния технологических

параметров производства мелющих шаров из отбраковки рельсовой стали марки К76Ф на их ударную стойкость в условиях ОАО «Гурьевский металлургический завод». Показано, что содержание в стали углерода, водорода и серы определяют вероятность раскола шаров при копровых испытаниях на 48 %, относительная степень влияния температуры прокатки составляет 23 %, а степень влияния параметров термической обработки оценивается на уровне 29 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Абенова 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.
2. 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.
3. 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. P. 325–329.

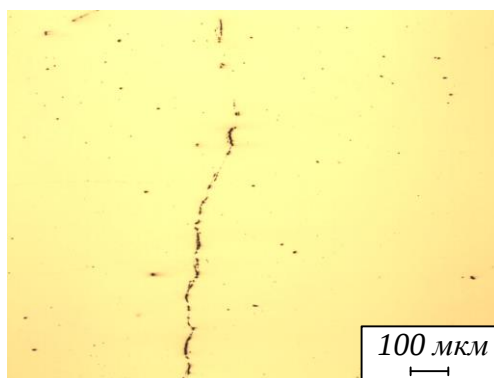


Рис. 3. Внутренние трещины в шаре из стали марки К76Ф, расколовшемся при копровых испытаниях
Fig. 3. Internal cracks in the ball made of steel grade K76F, split during the copra tests

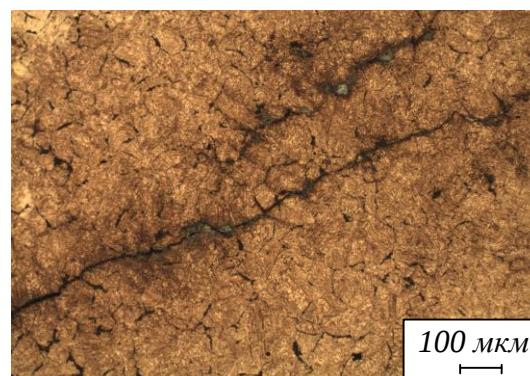


Рис. 4. Микротрещина по границам зерен в шаре из стали марки К76Ф, разрушившемся при испытаниях на ударную стойкость
Fig. 4. Microcrack along grain boundaries in a ball made of K76F steel, destroyed during impact resistance tests

4. Вавилкин Н.М., Челноков В.В. К выбору материала для производства мелющих шаров // Известия вузов. Черная металлургия. 2002. № 1. С. 41–46.
5. Чиж Е.В., Абенова М.Б. Выбор и анализ технологии изготовления мелющих тел // Теория и технология металлургического производства. 2016. № 2. С. 42–43.
6. Рахутин, М.Г., Бойко П.Ф. Пути совершенствования методов оценки основных характеристик мелющих шаров // Уголь. 2017. №12. С. 49–51.
7. Ефременко В.Г. Металлографический анализ причин разрушения стальных катаных тел для барабанных мельниц // Вестник Приазовского государственного технического университета. 2000. № 9. С. 89–91.
8. Уманский А.А., Головатенко А.В., Шукин А.Г., Симачев А.С. Исследование влияния параметров закалочной микроструктуры мелющих шаров, произведенных методом поперечно-винтовой прокатки, на их эксплуатационные характеристики // Производство проката. 2019. № 3. С. 34–39.
9. Уманский А.А., Головатенко А.В., Темлянцев М.В., Осколкова Т.Н., Симачев А.С. Исследование качественных характеристик помольных шаров при их производстве на стане винтовой прокатки // Металлург. 2019. № 6. С. 43–46.
10. 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.
11. 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.
12. Журнажи В.И., Ефременко В.Г., Дунаев Е.В., Лекату А., Куса Р.А. Повышение объемной твердости стальных мелющих шаров применением Q-п-Р термической обработки // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. 2018. № 2 (74). С. 103–113.
13. Баранов Н.А., Тулупов О.Н. Производство мелющих шаров из рельсовой стали // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2017. Т. 1. С. 96–99.
14. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T., 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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. Т. 62. № 4. С. 283–289.
19. Быков П.О., Касимгазинов А.Д. Исследование и апробация технологии получения катаных помольных шаров 5 группы твердости в условиях ПФ ТОО «Кастинг» // Наука и техника Казахстана. 2018. № 1. С. 31–40.
20. 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.

REFERENCES

1. Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Abenova M.B., Kulikov V.D., Kondrat'ev I.S. The quality of grinding balls made by various methods. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. 2015, no.1 (16), pp. 78–81. (In Russ.).
2. Krutilin A.N., Bestuzhev N.I., Bestuzhev A.N., Kalenkovich D.N. Grinding bodies. Problems. Prospects. *Lit'e i metallurgiya*. 2009, no. 4 (53), pp. 26–33. (In Russ.).
3. 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.
4. Vavilkin N.M., Chelnokov V.V. To the choice of material for the production of grinding balls. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2002, no. 1, pp. 41–46. (In Russ.).
5. Chizh E.V., Abenova M.B. Selection and analysis of manufacturing technology of grinding media. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. 2016, no. 2, pp. 42–43. (In Russ.).
6. Rakhutin, M.G., Boiko P.F. Ways of improving methods for assessing the main characteristics of grinding balls. *Ugol'*. 2017, no. 12, pp. 49–51. (In Russ.).
7. Efremenko V.G. Metallographic analysis of the causes of destruction of rolled steel bodies for drum mills. *Vestnik Priazovskogo gosudar-*

- stvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2000, no. 9, pp. 89–91. (In Russ.).
8. Umanskii A.A., Golovatenko A.V., Shchukin A.G., Simachev A.S. Investigation of the influence of the parameters of the quenching microstructure of grinding balls produced by the method of cross-screw rolling on their operational characteristics. *Proizvodstvo prokata*. 2019, no. 3, pp. 34–39. (In Russ.).
 9. Umanskii A.A., Golovatenko A.V., Temlyantsev M.V., Oskolkova T.N., Simachev A.S. Investigation of the qualitative characteristics of grinding balls during their production at a screw rolling mill. *Metallurg*. 2019, no. 6, pp. 43–46. (In Russ.).
 10. 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, no. 6, pp. 64–69. (In Russ.).
 11. 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.
 12. Zurnadzhi V.I., Efremenko V.G., Dunaev E.V., Lekatu A., Kusa R.A. Increasing the volumetric hardness of steel grinding balls using Q-n-P heat treatment. *Nauka i progress transporta. Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zhelezнодорожного транспорта*. 2018, no. 2 (74), pp. 103–113. (In Russ.).
 13. Baranov N.A., Tulupov O.N. Production of grinding balls from rail steel. *Aktual'nye problemy sovremennoi nauki, tekhniki i obrazovaniya*. 2017, vol. 1, pp. 96–99. (In Russ.).
 14. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T., 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.
 15. 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.
 16. 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.
 17. 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.).
 18. Umanskii A.A., Golovatenko A.V., Oskolkova T.N., Simachev A.S., Shchukin A.G. Shchukin A.G. Investigation of the effect of macro- and microstructure of steel grinding balls on their impact resistance. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 4, pp. 283–289. (In Russ.).
 19. Bykov P.O., Kasimgazinov A.D. Research and approbation of technology for producing rolled grinding balls of hardness group 5 in the conditions of PF Casting LLP. *Nauka i tekhnika Kazakhstana*. 2018, no. 1, pp. 31–40. (In Russ.).
 20. Umanskii A.A., Simachev A.S., Dumova L.V. Development of technology for the production of grinding media with increased performance properties from the rejection of rail steels. *Chernye metally*. 2021, no. 5, pp. 57–62. (In Russ.).

Сведения об авторах

Александр Александрович Уманский, д.т.н., доцент кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет
Email: umanskii@bk.ru

Артём Сергеевич Симачев, к.т.н., доцент кафедры обработки металлов давлением и металловедения. ЕВРАЗ ЗСМК, Сибирский государственный индустриальный университет
Email: simachev_as@mail.ru

Любовь Валерьевна Думова, старший преподаватель кафедры менеджмента и отраслевой экономики, Сибирский государственный индустриальный университет
Email: keup-iem@mail.ru

Сергей Олегович Сафонов, ассистент кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет
Email: sergey.safonov.1950@mail.ru

Information about the authors

Aleksandr A. Umanskii, Ph.D., Associate Professor of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University
Email: umanskii@bk.ru

Artem S. Simachev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Department of Metalworking and Metal Science. EVRAZ ZSMK, Siberian State Industrial University
Email: simachev_as@mail.ru

Lyubov' Valer'evna Dumova, Senior Lecturer of the Department of Management and Industrial Economics, Siberian State Industrial University
Email: keup-iem@mail.ru

Sergei Olegovich Safonov, Assistant of the Department of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University
Email: sergey.safonov.1950@mail.ru

Поступила в редакцию 12.07.2022
После доработки 15.08.2022
Принята к публикации 18.08.2022

Received 12.07.2022
Revised 15.08.2022
Accepted 18.08.2022