

**Оригинальная статья**

УДК 669.184

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-1(47)-127-134

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ И  
ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ КОНВЕРТЕРНЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА  
МЕЛЮЩИХ ШАРОВ**

© 2024 г. И. С. Морозов, А. А. Уманский, Е. В. Протопопов, А. С. Симачев

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

**Аннотация.** Проведены исследования процессов и механизмов формирования металлургического качества мелющих шаров и их эксплуатационных характеристик в зависимости от параметров производства специализированных сталей в условиях кислородно-конвертерного производства АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат». Основными причинами неудовлетворительной ударной стойкости мелющих шаров из стали марок Ш2.1 и Ш2.3 является наличие дефектов сталеплавленного происхождения (флокены, скопления неметаллических включений, внутренние несплошности (поры) и развитая химическая неоднородность). Определено, что большое влияние на повышение ударостойкости мелющих шаров оказывает снижение содержания кислорода в металле на выпуске в ковш, уменьшение содержания серы и водорода в стали после ковшевой обработки, а также повышение длительности продувки стали инертным газом в процессе внепечной обработки на агрегате ковш-печь. Суммарная относительная степень влияния рассмотренных на отбраковку мелющих шаров при испытаниях на ударную стойкость составляет 73 %. На основании полученных закономерностей для условий рассматриваемого предприятия разработаны рекомендации по совершенствованию технологических режимов выплавки и внепечной обработки сталей для производства мелющих шаров, использование которых на практике подтвердило их эффективность. Зафиксировано снижение отбраковки мелющих шаров из стали марок Ш2.1 и Ш2.3 при копровых испытаниях в среднем на 3 % за счет снижения дефектообразования в исходных непрерывнолитых заготовках.

**Ключевые слова:** конвертерная сталь, внепечная обработка, внутренние дефекты, мелющие шары, ударная стойкость, неметаллические включения

**Для цитирования:** Морозов И.С., Уманский А.А., Протопопов Е.В., Симачев А.С. Совершенствование технологии выплавки и внепечной обработки специализированных конвертерных сталей для производства мелющих шаров. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;1(47):127–134. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-127-134](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-127-134)

**Original article**

**IMPROVING THE TECHNOLOGY OF SMELTING AND OUT-OF-FURNACE  
PROCESSING OF SPECIALIZED CONVERTER STEELS FOR THE PRODUCTION  
OF GRINDING BALLS**

© 2024 I. S. Morozov, A. A. Umanskii, E. V. Protopopov, A. S. Simachev

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

**Abstract.** The processes and mechanisms of forming the metallurgical quality of grinding balls and their operational characteristics have been studied depending on the parameters of the production of specialized steels in the conditions of oxygen converter production of JSC EVRAZ United West Siberian Metallurgical Combine. The

main reasons for the unsatisfactory impact resistance of grinding balls made of steel grades Sh2.1 and Sh2.3 are the presence of defects of steelmaking origin (flocules, accumulations of non-metallic inclusions, internal discontinuities (pores) and developed chemical heterogeneity). It was determined that a great influence on increasing the impact resistance of grinding balls is exerted by a decrease in the oxygen content in the metal at the outlet into the bucket, a decrease in the sulfur and hydrogen content in the steel after bucket treatment, as well as an increase in the duration of steel purging with inert gas during out-of-furnace treatment on the bucket-furnace unit. The total relative degree of influence of the grinding balls considered for rejection during impact resistance tests is 73 %. Based on the obtained patterns for the conditions of the enterprise under consideration, recommendations have been developed to improve the technological modes of smelting and out-of-furnace processing of steels for the production of grinding balls, the use of which in practice has confirmed their effectiveness. A decrease in the rejection of grinding balls from steel grades Sh2.1 and Sh2.3 during drilling tests was recorded by an average of 3 % due to a decrease in defect formation in the initial continuously cast billets.

**Keywords:** converter steel, non-furnace treatment, internal defects, grinding balls, impact resistance, non-metallic inclusions

**For citation:** Morozov I.S., Umanskii A.A., Protopopov E.V., Simachev A.S. Improving the technology of smelting and out-of-furnace processing of specialized converter steels for the production of grinding balls. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;1(47):127–134. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-127-134](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-127-134)

### Введение

Стальные мелющие (помольные) шары являются в настоящее время одним из наиболее востребованных видов металлопроката. Это объясняется широкой областью применения помольных шаров, которая включает в себя измельчение исходного сырья и материалов на предприятиях металлургической, горнорудной, цементной промышленности [1 – 3]. Необходимо констатировать, что наиболее значительная доля мелющих шаров производится из специальных шаровых сталей, химический состав которых регламентирован внутренней документацией предприятий (техническими условиями, стандартом организации, техническим стандартом). Для производства шаров широкое применение также находит отбраковка заготовок рельсовых сталей и рельсов [4 – 7].

Основными параметрами качества мелющих шаров, исходя из условий их эксплуатации, выступают твердость и устойчивость к ударным нагрузкам [8 – 12]. Требуемая высокая твердость шаров успешно достигается за счет применения для их производства средне- и высокоуглеродистых сталей [13; 14]. В ряде случаев эти стали дополнительно легируют хромом, марганцем, никелем, молибденом [15 – 17]. Также в обязательном порядке предусмотрена закалка мелющих шаров [18 – 22]. При этом производство шаров, обладающих высокой ударостойкостью, представляет объективную проблему, что обусловлено влиянием металлургического качества шаров (наличием флокенов, расслоений, дефектов усадочного происхождения) на рассматриваемую характеристику [23 – 25]. Поскольку формирование металлургического качества шаров обусловлено технологическими режимами производства стали, то совершенствование тех-

нологии выплавки и внепечной обработки шаровых сталей является актуальной задачей.

### Методика проведения исследований

Исследования, направленные на совершенствование выплавки и внепечной обработки шаровых сталей, проводили применительно к условиям кислородно-конвертерного цеха № 2 (ККЦ-2) АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ ЗСМК») и включали в себя два основных этапа.

На первом этапе с использованием металлографического анализа исследовали характерные дефекты мелющих шаров, являющиеся причиной их раскола при испытаниях на ударную стойкость (при копровых испытаниях). В качестве объекта исследований использовали шары diam. 40, 50 и 60 мм 20-ти плавок конвертерной стали специализированных марок Ш2.1 и Ш2.3 производства ККЦ-2 АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Также дополнительно проводили исследования макро- и микроструктуры заготовок. Для проведения металлографических исследований применяли оптический микроскоп OLYMPUS GX-51, оснащенный цифровой металлографической камерой. В дополнении к металлографическим исследованиям анализировали степень развития ликвационных процессов по сечению заготовок путем рентгеноспектрального анализа проб (рентгенофлуоресцентный спектрометр Shimadzu XRF-1800). Относительную степень ликвации определяли по следующей формуле:

$$L_3 = \frac{(C_3^X - C_3^{ПЛ})}{C_3^{ПЛ}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где  $C_9^x$  и  $C_9^{пл}$  – содержание элемента в точке замера и по данным ковшевой пробы, %.

На втором этапе провели статистические исследования влияния параметров выплавки и внепечной обработки сталей рассматриваемых марок на отбраковку шаров по результатам их копровых испытаний. Использовали стандартные методики множественного регрессионного и дисперсионного анализов. Применяли метод пассивного эксперимента, в качестве объекта исследования использовали случайную выборку из 100 плавок стали марок Ш2.1 и Ш2.3 текущего производства ККЦ-2 АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

В качестве параметра оптимизации при проведении статистических исследований использовали отбраковку шаров по результатам копровых испытаний. При проведении дисперсионного анализа исследовали влияние бригады и смены производства стали. Для регрессионного анализа выбрали следующие параметры:

- состав металлошихты конвертерной плавки;
- температура и химический состав металла на выпуске из конвертера;
- окисленность стали на выпуске из конвертера;
- химический состав конвертерного и ковшевого шлака;
- температура и химический состав металла при обработке на установке доводки металла (УДМ);
- температура и химический состав металла при обработке на агрегате ковш-печь (АКП);
- продолжительность продувки инертным газом на УДМ и АКП;
- температура окончания обработки стали на УДМ и АКП.
- содержание водорода в стали после внепечной обработки.

### Результаты исследований и их обсуждение

На основании проведенных металлографических исследований в изломе шаров из стали марок Ш2.1 и Ш2.3, невыдержавших испытания на ударную стойкость, обнаружены следующие виды дефектов: флокены (рис. 1, *a*), ликвационные полосы (рис. 1, *b*), скопления неметаллических включений (рис. 1, *в – д*) и внутренние несплошности на фоне скоплений неметаллических включений (рис. 1, *e*). Указанные дефекты встречаются преимущественно в центральной зоне шаров.

При проведении исследований было определено, что примерно в 10 % изломах шаров выявленные дефекты макро- и микроструктуры отсутствуют, то есть излом имеет усталостный характер (рис. 2).

При изучении макроструктуры исходных заготовок установлено, что примерно 10 % из них поражены флокенами (рис. 3, *a*). Подтверждением этого (помимо внешнего вида) является отсутствие неметаллических включений в зоне их расположения (рис. 3, *b*).

Установлено наличие значительной ликвации углерода, серы и фосфора по сечению заготовок. Минимальное содержание указанных химических элементов имеет место в приповерхностной зоне заготовок, а максимальное – в осевой. По данным проведенных исследований степень ликвации по углероду составляет от –3 до 16 %, по сере – от –33 до 71 %, по фосфору – от –12 до 78 %. При исследовании неметаллических включений установлено, что наибольшая концентрация включений в виде оксидов, недеформирующихся силикатов и сульфидов обнаруживается в центральной зоне заготовок. Если в приповерхностной зоне заготовок имеют место неметаллические включения в виде оксидов и силикатов минимальных баллов по ГОСТ 1778 – 2022 (баллы 1а, 1б), то в центральной зоне заготовок концентрация указанных включений значительно выше и соответствуют баллам до 4а, 4б (ГОСТ 1778 – 2022).

На основании дисперсионного анализа установлено, что с вероятностью 95 % бригада и смена выплавки стали не оказывают значимого влияния на отбраковку шаров по результатам копровых испытаний. По результатам регрессионного анализа получили, что повышение окисленности стали на выпуске из конвертера, увеличение содержания серы в готовой стали, снижение длительности продувки при внепечной обработке металла на АКП и увеличение содержания водорода после внепечной обработки оказывают значимое влияние на увеличение отбраковки мелющих шаров по результатам их испытаний на ударную стойкость:

$$B_K = 4,9 + 0,015[O] + 84,6[S] - 0,024t_{\text{прод}} + 430[H], \quad (2)$$

где  $B_K$  – отбраковка шаров по результатам копровых испытаний на ударную стойкость, %;  $[O]$  – окисленность стали на выпуске из конвертера, ppm;  $[S]$  – содержание серы в готовой стали, %;  $t_{\text{прод}}$  – продолжительность продувки аргоном при обработке стали на агрегате ковш-печь, мин;  $[H]$  – содержание водорода в стали, ppm.

Суммарная степень влияния перечисленных параметров выплавки и внепечной обработки стали на ударную стойкость производимых шаров составила 73 %. Необъясненная вариация в размере 27 % обусловлена отсутствием данных о ряде технологических параметров в пригодной

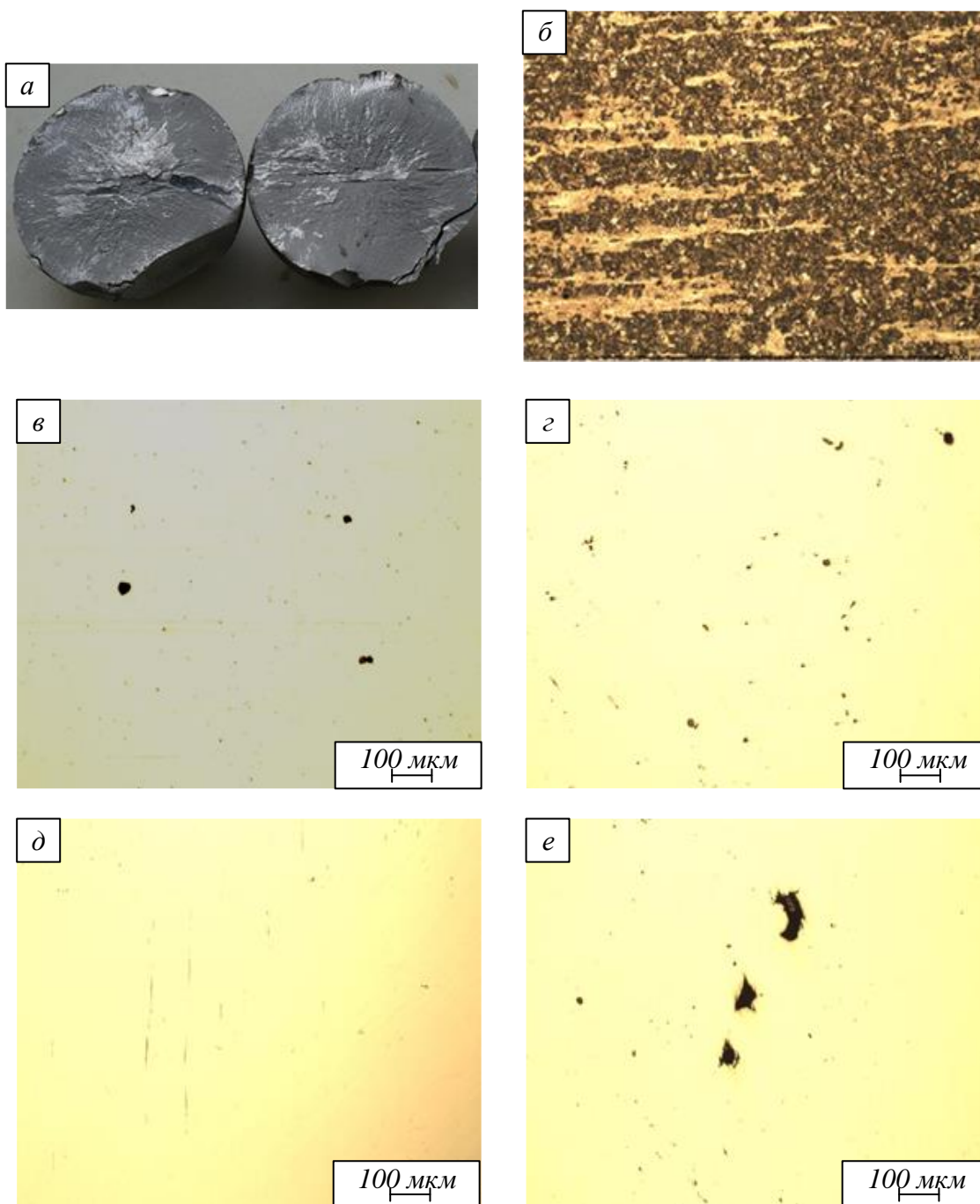


Рис. 1. Характерные дефекты в изломе шаров:  
*a* – флокены; *б* – ликвационные полосы; *в* – силикаты недеформирующиеся балл 4б; *г* – оксиды точечные балл 4а;  
*д* – сульфиды балл 3б; *е* – силикаты недеформирующиеся балл 2а + поры  
 Fig. 1. Characteristic defects in the fracture of the balls:  
*a* – floccules; *б* – liquation bands; *в* – non-deformable silicates score 4b; *г* – point oxides score 4a; *д* – sulfides score 3b;  
*е* – non-deformable silicates score 2a + pores

для анализа форме, а также влиянием параметров непрерывной разливки стали, не анализированными в ходе настоящего исследования.

Влияние повышения окисленности металла при выпуске из конвертера в ковш на снижение ударостойкости шаров обусловлено обратной зависимостью между содержанием кислорода в нераскиленной стали с количеством неметаллических включений, образующихся при вводе ферросплавов и легирующих добавок. Повы-

шенная окисленность стали на выпуске приводит к увеличению концентрации оксидных и силикатных включений в стали, скопления которых обнаружены в изломе шаров, невыдержавших копровые испытания (рис. 1, *в*, *г*).

Полученные данные о снижении ударной стойкости мелющих шаров при повышенном содержании серы в стали объясняются увеличением концентрации сульфидных неметалличес-



Рис. 2. Излом усталостного характера в шарах, не выдержавших испытания на ударную стойкость  
Fig. 2. Fatigue fracture in balls, balls that have not passed the impact resistance test

ких включений, скопления которых также обнаружены в изломах мелющих шаров (рис. 1, *д*).

Увеличение длительности продувки металла в ковше инертным газом способствует уменьшению развития химической неоднородности и интенсификации процессов рафинирования расплава от неметаллических включений, чем и объясняется снижение отбраковки мелющих шаров с учетом типов характерных дефектов в изломе шаров (рис. 1).

Повышение содержания водорода в стали закономерно увеличивает вероятность образования флокенов, являющихся концентраторами напряжений при ударных нагрузках и приводящих к расколу шаров при их копровых испытаниях (рис. 1, *а*).

На основании полученных закономерностей формирования металлургического качества и ударной стойкости мелющих шаров разработаны усовершенствованные технологические режимы выплавки и внепечной обработки в ККЦ-2 АО «ЕВРАЗ ЗСМК» стали марок Ш2.1 и Ш2.3, использование которых позволило снизить от-

браковку мелющих шаров при копровых испытаниях на 3 % за счет снижения количества дефектов макро- и микроструктуры сталеплавильного происхождения.

#### Выводы

На основании исследований, проведенных в условиях кислородно-конвертерного цеха № 2 АО «ЕВРАЗ ЗСМК», определены механизмы влияния параметров выплавки и внепечной обработки специальных сталей массового сортамента на качество и эксплуатационные характеристики производимых мелющих шаров. Определено, что снижение окисленности стали на выпуске из конвертера и содержания серы в готовой стали, повышение длительности продувки расплава инертным газом в процессе его ковшевой обработки и уменьшение содержания водорода в стали после внепечной обработки позволяют значительно повысить ударную стойкость мелющих шаров из сталей марок Ш2.1 и Ш2.3 за счет снижения количества дефектов металлургического происхождения. Полученные законо-

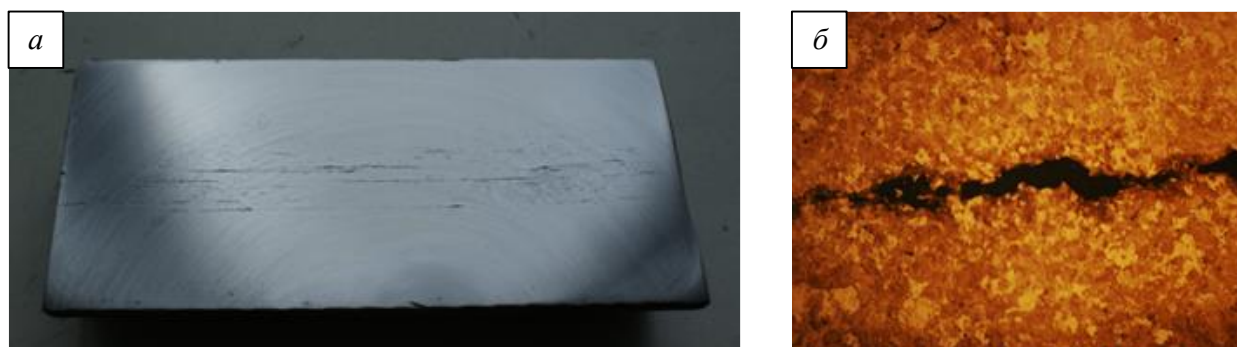


Рис. 3. Флокены в продольных образцах заготовок:  
*а* – шлифованные образцы; *б* – образцы после травления  
Fig. 3. Floccules in longitudinal samples of workpieces:  
*a* – ground samples; *b* – samples after etching

мерности использованы при разработке новых режимов производства шаровых сталей, применение которых в рассматриваемом цехе позволило снизить отбраковку шаров на 3 %.

#### 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):26–33. EDN: UYGFVX; <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2009-4-26-33>
2. Umansky A.A., Prudnikov A.N., Golovatenko A.V. Analysis of the main trends in the development of the production of grinding balls in Russia and abroad. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;866:012032. EDN: SVCJAB; <https://doi.org/10.1088/1757-899X/866/1/012032>
3. Сычков А.Б., Стеблов А.Б., Березов С.Н. О выборе материала и режимов термической обработки стальных мелющих шаров, отвечающих требованиям современного мирового рынка. *Литье и металлургия*. 2013;3(71):30–32. EDN: SWKLVV.
4. Баранов Н.А., Тулупов О.Н. Производство мелющих шаров из рельсовой стали. *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования*. 2017;1:96–99. EDN: ZEYVJL.
5. 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>
6. 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. <http://dx.doi.org/10.24425/118901>
7. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T. A cross wedge rolling process for forming 70 mm diameter balls from heads of scrap railway rails. In: *27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, Faim2017*. 2017;11:466–473. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.137>
8. Song Zh., Pu Y., Liu Zh., Wang B. Analysis of Failure of Grinding Balls During Service. *Metal Science and Heat Treatment*. 2022;64(12):127–133. EDN: MRJHRG; <https://doi.org/10.1007/s11041-022-00772-3>
9. Артес А.Э., Третьюхин В.В. Проблема совершенствования производства мелющих шаров. Качество и инновации. *Компетентность*. 2014;3(114):50–53. EDN: SBZHQH.
10. Aldrich C. Consumption of steel grinding media in mills. *Minerals Engineering*. 2013;49:77–91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2013.04.023>
11. Umucu Y., Deniz V. The effect of ball type in fine particles grinding on kinetic breakage parameters. *Inzynieria Mineralna*. 2015;16(1):197–203.
12. Чжаоян С., Исун П., Чжисинь Л, Баоци В. Анализ причин растрескивания мелющих шаров при эксплуатации. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2022;2(800):59–65. <https://doi.org/10.30906/mitom.2022.2.59-65>
13. Смирнов Е.Н., Смирнов А.Н., Михеев В.В., Скляр В.А., Белевитин В.А., Верзилов А.П., Орлов Г.А. Оценка применимости непрерывнолитой стали марки 55 при производстве мелющих шаров диаметром 40 мм групп твердости IV и V. *Сталь*. 2020;4:44–49. EDN: VXGXNJ.
14. Лам М.М., Серов А.И., Смирнов Е.Н., Тернавский А.А., Базарова Г.С. Промышленные испытания мелющих шаров IV группы твердости производства ПАО «Донецкий металлопрокатный завод». *Металлург*. 2016;9:63–67. EDN: WYDMPN.
15. 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;1:31–40. EDN: XZDEKD.
16. 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 Черноморья*. 2016;4 (46):78–86. EDN: XIBQUB.
17. Сталинский Д.В., Рудюк А.С., Соленный В.К. Освоение производства и оценка эффективности использования высококачественных мелющих шаров. Сообщение 1. Освоение производства шаров из хромомolibденовой стали. *Сталь*. 2021;11:36–39. EDN: XBFNUB.
18. Сталинский Д.В., Рудюк А.С., Соленный В.К. Выбор материала и технологии термической обработки мелющих шаров, работающих преимущественно в условиях абразивного износа. *Сталь*. 2017;6:64–69. EDN: YUNGPB.
19. Bai X., Jin Y. Heat treatment of wear resistant steel ball for large ball mill. *Jinshu Rechuli / Heat Treatment of Metals*. 2017;42(5):193–196.

<http://dx.doi.org/10.13251/j.issn.0254-6051.2017.05.040>

20. Айсат С., Садэдин А., Брадай М.А., Юнус Р., Билек А., Бенаббас А. Влияние термической обработки на твердость и износ мелющих шаров. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2017;5(743):34–38.
  21. Кузьмин С.О. Влияние режима термоупрочнения на объемную износостойкость мелющих шаров из низколегированных марок стали. *Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2011;23:117–126. EDN: TTGPTV.
  22. Самойлович Ю.А. Возможности повышения эксплуатационного ресурса крупных мелющих шаров из высокохромистой стали при использовании термоциклической обработки. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2017;6(1410):73–80. EDN: ZCSUQD.
  23. Ефременко В.Г. Металлографический анализ причин разрушения стальных катаных тел для барабанных мельниц. *Вестник Приазовского государственного технического университета*. 2000;9:89–91.
  24. Ефременко В.Г. Влияние макроструктурного состояния шаровой заготовки на качество стального проката для помольного оборудования. *Металл и литье Украины*. 2002;9–10:40–42.
  25. Галимьянов И.К. Влияние температуры и структуры круглой заготовки на раскол мелющих шаров. *Черные металлы*. 2019;10:63–66. EDN: RLVBST.
- REFERENCES**
1. Krutilin A.N., Bestuzhev N.I., Bestuzhev A.N., Kalenkovich D.N. Grinding bodies. Problems. The prospects. *Lit'e i metallurgiya*. 2009;4 (53):26–33. (In Russ.). EDN: UYGFVX; <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2009-4-26-33>
  2. Umansky A.A., Prudnikov A.N., Golovatenko A.V. Analysis of the main trends in the development of the production of grinding balls in Russia and abroad. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;866:012032. EDN: SVCJAB; <https://doi.org/10.1088/1757-899X/866/1/012032>
  3. Sychkov A.B., Steblov A.B., Berezov S.N. On the choice of materials and modes of heat treatment of steel grinding balls that meet the requirements of the modern world market. *Lit'e i metallurgiya*. 2013;3(71):30–32. EDN: SWKLVV. (In Russ.).
  4. Baranov N.A., Tulupov O.N. Production of grinding balls made of rail steel. *Aktual'nye problemy sovremennoi nauki, tekhniki i obrazovaniya*. 2017;1:96–99. EDN: ZEYVJL. (In Russ.).
  5. 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>
  6. 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. <http://dx.doi.org/10.24425/118901>
  7. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T. A cross wedge rolling process for forming 70 mm diameter balls from heads of scrap railway rails. In: *27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, Faim2017*. 2017;11:466–473. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.137>
  8. Song Zh., Pu Y., Liu Zh., Wang B. Analysis of Failure of Grinding Balls During Service. *Metal Science and Heat Treatment*. 2022;64(12):127–133. EDN: MRJHRG; <https://doi.org/10.1007/s11041-022-00772-3>
  9. Artes A.E., Tret'yukhin V.V. The problem of improving the production of grinding balls. Quality and innovation. *Kompetentnost'*. 2014;3(114):50–53. EDN: SBZHQH. (In Russ.).
  10. Aldrich C. Consumption of steel grinding media in mills. *Minerals Engineering*. 2013;49:77–91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2013.04.023>
  11. Umucu Y., Deniz V. The effect of ball type in fine particles grinding on kinetic breakage parameters. *Inzynieria Mineralna*. 2015;16(1):197–203.
  12. Chzhaoyan S., Isun P., Chzhisun' L., Baotsi V. Analysis of the causes of cracking of grinding balls during operation. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 2022;2(800):59–65. (In Russ.). <https://doi.org/10.30906/mitom.2022.2.59-65>
  13. Smirnov E.N., Smirnov A.N., Mikheev V.V., Sklyar V.A., Belevitin V.A., Verzilov A.P., Orlov G.A. Assessment of the applicability of continuous cast steel grade 55 in the production of grinding balls with a diameter of 40 mm of hardness groups IV and V. *Stal'*. 2020;4:44–49. EDN: VXGXNJ. (In Russ.).
  14. Lam M.M., Serov A.I., Smirnov E.N., Ternavskii A.A., Bazarova G.S. Industrial tests of grinding balls of the IV hardness group produced by PJSC Donetsk Metal Rolling Plant. *Metallurg*. 2016;9:63–67. EDN: WYDMPN. (In Russ.).
  15. Bykov P.O., Kasimgazinov A.D. Research and testing of technology for producing rolled grinding balls of hardness group 5 in the conditions of PF Casting LLP. *Nauka i tekhnika Kazakhstana*. 2018;1:31–40. EDN: XZDEKD. (In Russ.).
  16. 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;4 (46):78–86. EDN: XIBQUB. (In Russ.).

17. Stalinskii D.V., Rudyuk A.S., Solenyi V.K. Mastering the production and evaluating the effectiveness of using high-quality grinding balls. Message 1. Mastering the production of balls made of chrome-molybdenum steel. *Stal'*. 2021;11:36–39. EDN: XBFNUB. (In Russ.).
18. Stalinskii D.V., Rudyuk A.S., Solenyi V.K. The choice of material and technology for heat treatment of grinding balls, working mainly in conditions of abrasive wear. *Stal'*. 2017;6:64–69. EDN: YUNGPB. (In Russ.).
19. Bai X., Jin Y. Heat treatment of wear resistant steel ball for large ball mill. *Jinshu Rechuli / Heat Treatment of Metals*. 2017;42(5):193–196. <http://dx.doi.org/10.13251/j.issn.0254-6051.2017.05.040>
20. Aisat S., Sadeddin A., Bradai M.A., Yunus R., Bilek A., Benabbas A. The effect of heat treatment on the hardness and wear of grinding balls. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 2017;5(743):34–38. (In Russ.).
21. Kuz'min S.O. The effect of the thermal hardening regime on the volumetric wear resistance of grinding balls made of low-alloy steel grades. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2011;23:117–126. EDN: TTGPTV. (In Russ.).
22. Samoilovich Yu.A. The possibilities of increasing the operational life of large grinding balls made of high-chromium steel when using thermocyclic processing. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii*. 2017;6(1410):73–80. EDN: ZCSUQD. (In Russ.).
23. Efremenko V.G. Metallographic analysis of the causes of destruction of rolled steel bodies for drum mills. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2000;9:89–91. (In Russ.).
24. Efremenko V.G. The effect of the macrostructural state of the ball billet on the quality of rolled steel for grinding equipment. *Metall i lit'e Ukrainy*. 2002;9–10:40–42. (In Russ.).
25. Galim'yanov I.K. The effect of the temperature and structure of the round billet on the splitting of grinding balls. *Chernye metally*. 2019;10:63–66. EDN: RLVBST. (In Russ.).

**Сведения об авторах**

**Иван Сергеевич Морозов**, соискатель степени к.т.н. кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет  
**Email:** ismorozov23@mail.ru

**Александр Александрович Уманский**, д.т.н., доцент кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет  
**Email:** umanskii@bk.ru  
**ORCID:** 0000-0003-4403-9006

**Евгений Валентинович Протопопов**, д.т.н., профессор, профессор кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет  
**Email:** protopopov@sibsiu.ru  
**ORCID:** 0000-0002-7554-2168

**Артем Сергеевич Симачев**, к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением и металловедение. ЕВРАЗ ЗСМК», Сибирский государственный индустриальный университет  
**Email:** simachev\_as@mail.ru  
**ORCID:** 0000-0002-9712-3757

**Information about the authors**

**Ivan S. Morozov**, Candidates for a Degree of Cand. Sci. (Eng.) of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University  
**Email:** ismorozov23@mail.ru

**Aleksandr A. Umanskiy**, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University  
**Email:** umanskii@bk.ru  
**ORCID:** 0000-0003-4403-9006

**Evgenii V. Protopopov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University  
**Email:** protopopov@sibsiu.ru  
**ORCID:** 0000-0002-7554-2168

**Artem S. Simachev**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Metal Forming and Metal Science. “EVRAZ ZSMK”, Siberian State Industrial University  
**Email:** simachev\_as@mail.ru  
**ORCID:** 0000-0002-9712-3757

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 17.01.2024  
 После доработки 29.01.2024  
 Принята к публикации 07.02.2024

Received 17.01.2024  
 Revised 29.01.2024  
 Accepted 07.02.2024