

Исследования в области оптимизации химического состава и термической обработки стальных шаров для мельниц

Великородный П. С. 

(Статья представлена членом редакционной коллегии Никуличевой Т. Б.)
Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85
pasha.sergeevich.2000@mail.ru

Аннотация. Проведен анализ российских и зарубежных исследований в сфере производителей мелющих шаров различных размеров для металлургической, горно-обогатительной и другой промышленности. Рассмотрены основные направления для улучшения химического состава стали при производстве мелющих шаров, а также исследования, оптимизирующие термическую обработку мелющих тел для повышения их механических характеристик. Повышение твердости шара при сохранении им стойкости к ударным и абразивным нагрузкам является актуальной задачей в настоящее время. Основные же дефекты мелющих тел – это трещины внутри шара, различного рода включения. Дефекты негативно влияют на механические и эксплуатационные характеристики шара, ухудшая их. Для решения данных задач необходимо оптимальное содержание кислорода, углерода и легирующих элементов в стали. Моделирование процесса изготовления шаров перед их реальным производством продукции помогает предварительно высчитать необходимые параметры, что позволяет скорректировать структуру шара.

Ключевые слова: химический состав, термообработка, стальной шар, мелющее тело, шаровая мельница, винтовая прокатка, измельчение руды

Для цитирования: Великородный П.С. Исследования в области оптимизации химического состава и термической обработки стальных шаров для мельниц. *Прикладная математика & Физика*. 2025;57(3):243–248.
DOI 10.52575/2687-0959-2025-57-3-243-248 EDN UBLYMP

Review article

Research in the Field of Optimization of Chemical Composition and Heat Treatment of Steel Balls for Mills

Pavel V. Velikorodnyy 

(Article submitted by a member of the editorial board Nikulicheva T. B.)
Belgorod National Research University,
85 Pobedy St., Belgorod 308015, Russia
pasha.sergeevich.2000@mail.ru

Abstract. The analysis of Russian and foreign studies in the field of manufacturers of grinding balls of various sizes for metallurgy, mining and processing and other industries is carried out. The main directions for improving the chemical composition of steel in the production of grinding balls, as well as studies optimizing the heat treatment of grinding media to improve their mechanical characteristics are considered. Increasing the hardness of the ball while maintaining its resistance to impact and abrasive loads is an urgent task at present. The main defects of grinding media are cracks inside the ball, various types of inclusions. They negatively affect the mechanical and operational characteristics of the ball, worsening them. To solve these problems, the optimal content of oxygen, carbon and alloying elements in steel is necessary. Modeling the process of manufacturing balls before the production of products helps to pre-calculate the necessary parameters, which allows you to adjust the structure of the ball.

Keywords: Chemical Composition, Heat Treatment, Steel Ball, Grinding Body, Ball Mill, Screw Rolling, Ore Grinding

For citation: Velikorodnyy PV. Research in the Field of Optimization of Chemical Composition and Heat Treatment of Steel Balls for Mills. *Applied Mathematics & Physics*. 2025;57(3):243–248 (In Russ.)
DOI 10.52575/2687-0959-2025-57-3-243-248 EDN UBLYMP

1. Введение. Шары для помола из стали являются в настоящее время важным компонентом в процессе измельчения различных материалов. На сегодняшний день стальные и чугунные шары занимают существенную долю общего мирового проката, что можно объяснить применением их на многих производствах, таких как горнодобывающая, цементная, металлургическая, коксохимическая и другая промышленность, в которой необходимо измельчение материалов [1].

Основными параметрами качества мелющих шаров являются твердость, устойчивость к ударным нагрузкам и коррозионная стойкость [2]. Технология получения шаров при помощи винтового вида проката является одной из передовых технологий производства во всем мире, позволяющей получать

изделия с высокими механическими свойствами и точными геометрическими параметрами [3]. На качество изделия также сильно влияет химический состав сплава, из которого делаются шары, и режим термообработки полученного продукта [4].

Производство шаров, которые обладают повышенной износостойкостью и существенной стойкостью к разрушению, представляет объективную проблему, что можно объяснить сложностью технологии производства и возможным наличием трещин конечного продукта, что приведет к повышенной хрупкости. Увеличение ударной стойкости при наличии высокой твердости и прочности стального шара является актуальной задачей в настоящий момент [5]. Существует много исследований, направленных на оптимизацию структуры помольных тел, основными же направлениями увеличения твердости и устойчивости мелющих шаров к ударным нагрузкам являются: совершенствование химического состава мелющих тел, применение новых технологических решений термообработки. От качества стальных шаров зависит экономическая эффективность процесса измельчения, ведь на мелющие тела приходится до 67 процентов затрат при производстве различной продукции [6].

2. Исследования, направленные на улучшение химического состава мелющих шаров высокой твердости. Исследования химического состава стали для мелющих шаров повышенной твердости проводят уже многие годы.

В одной из работ рассматривалось количественное воздействие химических элементов сплава K76Ф на различные характеристики шара. Анализ был проведен при помощи статистического и металлографического критерия. В результате исследования было установлено, что при содержании в стали данной марки углерода и водорода выше допустимых расчетных значений ударная стойкость мелющих тел уменьшается до 50 процентов, что весьма существенно [7].

В статье [8] было установлено влияние химического состава стали на увеличение сопротивления упругой и пластичной деформации мелющих шаров. Авторами доказано, что увеличение доли хрома, никеля, марганца и углерода в некоторых диапазонах сильно влияет на сопротивление деформации шара. Исследование реализовано за счет экспериментальных марок стали, которые получили на основании анализа уже реализованных исследований в России и за рубежом. Работа проводилась в лаборатории при помощи прокручивания горячих заготовок из стали в специальной установке. Углерод оказывает более значительное влияние на свойства шара. Полученные данные дают возможность применения результатов на металлургических комбинатах, производящих мелющие тела [8].

При наличии таких дефектов, как различного рода включения, флокены, неоднородность структуры и трещины, шар имеет неудовлетворительные характеристики. Для минимизации подобных нарушений в компании «ЕВРАЗ» было проведено исследование влияния различных условий производства на характеристики готового продукта. Полученные результаты показывают, что стойкость шара от разрушений сильно зависит от количества кислорода в жидком металле, количества водорода и серы после внепечной обработки стали, а также от времени продувки металла специальным газом в ковше.

При сложении всех влияющих на характеристики шара факторов было установлено, что итоговые значения механических свойств помольных шаров зависят от них на 73 процента. Авторами данной работы, на основании полученных в результате исследования данных, были разработаны общие рекомендации для усовершенствования и подбора оптимальной технологии производства стали при плавке и дальнейшей обработке. Применение данных рекомендаций дало существенные экономические результаты. При улучшении качества стали качество круглого проката также улучшилось, что снизило количество некачественных шаров на 3 процента [9].

3. Исследования, направленные на усовершенствование термической обработки мелющих шаров. Для решения вопроса, связанного с разработкой улучшенной технологии термообработки шаров для мельниц, необходимо применение компьютерных моделей, которые наглядно показывают возможные значения механических характеристик стальных мелющих тел, а также протяженность закаленного слоя вглубь шара при использовании марок стали с различным химическим составом.

В исследовании [10] для улучшения термообработки шаров было проведено моделирование шаров из стали 70ХГС. Моделирование проводилось в программе Deform-3D. Для реализации эксперимента был найден заграничный аналог сплава 70ХГС. Температура 1050 °С приведена из физического опыта при прокатке шаров на стане. По критическим точкам получили температуру 730 °С, что соответствует температуре помольного тела перед закалкой. Прокаливаемость мелющих шаров рассчитана по методике ASTM A255 при помощи значений таблицы химического состава стали. Кривые охлаждения при реальном опыте соответствуют моделированию, что показывает точность готовой модели.

Полученные результаты в Deform-3D показали высокую достоверность и сошлись с результатами физического опыта как по внешней структуре, так и в центре шара. Модель дает возможность её использования для определения времени подстуживания. Экспериментальные данные процесса моделирования подстуживания и закалки показали выравнивание температуры по объему шара через 300 секунд. При использовании стали марки 70ХГС данного времени достаточно для того, чтобы произвести закалку и получить 5-ю группу твердости [10]. Для получения шаров 5 группы твердости диаметром 120 мм из стали

ХГС по ГОСТ необходима твердость шара на поверхности HRC=55...58 единиц со структурой мартенсита и HRC=45...48 в центре со структурой бейнит. Для того чтобы обеспечить подобные характеристики, авторами была сделана попытка уменьшения скорости охлаждения при помощи использования водного раствора наиритового латекса во время закалки. При помощи математического моделирования авторы определили температуру для закалки, которая должна быть равной 830...850°С, температуру ванны охлаждения – 20...30°С. За счет новой технологии скорость охлаждения в центре шаров уменьшилась, благодаря чему была получена необходимая структура. Благодаря уменьшению толщины прокаливаемости до 3 см, на поверхности шара образовалась необходимая мартенситная структура, а в сердцевине – бейнитная. Данная технология обеспечивает заданную твердость по всему объему шара [11].

Для оценки фазового состава, твердости и прочности мелющих шаров из стали 65C2X в другой научной работе было проведено программное исследование термической обработки в JMatPro и Deform. Моделирование процесса закалки реализовано для шаров 100 мм в диаметре. Результаты полученной модели показали, что при всех возможных отклонениях химического состава исходной заготовки в заданных диапазонах расчетная поверхностная твердость мелющих шаров будет не менее 58 HRC, а твердость в центре – около 46 HRC, что удовлетворяет требованиям 5-й группы твердости в соответствии с ГОСТ 7524-2015. Расчетная глубина закаливания составит около 1,5 см, что будет зависеть от содержания в стали легирующих элементов.

Исследование промышленной партии мелющих тел показало твердость на поверхности шара 57–60 HRC, твердость в центре шара – 43–47 HRC. Глубина закаленного слоя 1,5–2,0 см. Полученная модель дает достоверные данные, исходя из чего был сделан вывод о корректности полученного эксперимента. Модель позволяет учитывать неравномерность распределения температур по всему шару, а также она позволяет увидеть влияние разных факторов на процесс термообработки [12].

Еще одна математическая модель была создана для определения зависимости закалочного слоя шара от температуры аустенизации и размера шара. Полученные значения практически совпали с реальными экспериментальными данными. В результате были сделаны выводы: температура закалки и размер шара влияют на прокаливаемость больше, чем охлаждающая среда; перегрев шаров вызывает рост зерна, что в свою очередь провоцирует неправильную поверхность закалки [13]; повышение температуры закалки для некоторых видов стали вызывает уменьшение прочности шаров [14].

4. Патенты в области оптимизации процесса обработки стальных шаров. Одним из изобретений российских ученых является способ обработки, который позволяет получить высокую поверхностную твердость и хорошую прочность мелющих тел из среднеуглеродистой стали.

Обработка шаров по данной технологии включает следующие этапы: прокатка, штамповка или повторный нагрев мелющих шаров при температуре 950–1050°С; подстуживание мелющих шаров до температуры, примерно равной 770 градусов; закалка шаров в устройстве барабанного типа в течение 180–240 секунд; отпуск, который проводится при температуре 220 градусов ± 15 процентов и составляет от 3 до 5 часов по времени; самоотпуск в бункере в течение 0,5–2 суток. Данная технология может быть применена к выполненным из стали шарам с диаметром 80–100 мм.

Для шаров же диаметром 110–140 мм применяется следующая технология. После прокатки подстуживание шаров происходит до такой же температуры, как и для шаров меньшего диаметра; последующая закалка длится от 210 до 300 секунд; дальнейшие операции аналогичны с технологией производства шаров меньшего диаметра.

Разработанная технология позволяет производить шары с высокими механическими характеристиками за счет получения мартенсита по всему объему шара. Для получения такой структуры необходимо, чтобы охлаждение происходило при очень высокой скорости и прокаливаемость материала была на высоком уровне. Глубина прокаливаемости в свою очередь зависит от размера мелющего шара и химического состава стали, из которой он сделан. Сложность достижения необходимой скорости охлаждения заключается в том, что геометрическая форма шара не позволяет отдавать тепло по всему его объему, особенно плохо остывает центр шара. Для минимизации времени остывания по всему объему необходимо подобрать марку стали, легированную химическими элементами, которые позволяют увеличить прокаливаемость и достичь желаемого результата.

Однако при высокой прокаливаемости образуется другая проблема, которая заключается в высокой напряженности в центре шара, из-за чего в шаре могут образовываться трещины, что недопустимо в данном случае. Для минимизации и устранения всех негативных эффектов была взята сталь 77ХГФМН, легированная марганцем, кремнием, алюминием, хромом, никелем и молибденом, обладающая высокой прокаливаемостью. Подстуживание шаров до 770 градусов перед закалкой дает возможность получения необходимой структуры в центре и на поверхности шара. Время закалки шаров нужно регулировать, так как оно зависит от размера шара и его состава. Выбор необходимого времени закалки обеспечит требуемые значения твердости и прочности для помольных тел разного размера. Отпуск при рассчитанной температуре позволяет уменьшить внутренние напряжения и хрупкость, что дает хорошую защиту от разрушения шара.

Все опыты и проверки проводились в Нижнем Тагиле в шаропркатном цехе АО «ЕВРАЗ НТМК» при помощи шаров диаметрами 100 и 120 мм, прокатанных на винтовом стане при температуре нагрева заготовки 950–1050°C. Закалка шаров производилась в воде с температурой 45 градусов, а отпуск проводился в отпускной печи, работающей на газовом топливе и состоящей из 7 секций. После печи шары попадали в бункеры для самоотпуска. Твердость на поверхности измерялась на специальной установке в соответствии с ГОСТ 9013-59. Объемная твердость рассчитывалась по формулам исходя из полученных опытных значений.

При разделении шаров для опыта на две полусферы трещины на срезе не выявлены, что говорит о хорошем качестве продукции. Данная технология не совпадает с существующими патентами, что показывает новизну данного метода. Разработанная технология производства позволяет получить продукцию с отличной износостойкостью и соответствует ГОСТ 7524-2015 для пятой группы твердости. При внедрении технологии за первый год использования было реализовано более 1000 тонн данной продукции [15].

Еще один метод российских исследователей в области термообработки стальных шаров заключается в подстуживании прокатанных шаров до точки, которая находится ниже фазовых превращений, после чего происходит последующий нагрев шаров до закалочной температуры. Закалка шаров производится в устройстве барабанного типа с трубами, которое обеспечивает доступ воды к шарам и имеет винтовую направляющую в трубе, что обеспечивает закручивание шаров для лучшей терморегуляции. После закалки изделие подвергается отпуску. Цель обработки шаров заключается в придании изделию повышенных механических свойств.

Недостатки существующих способов закалки заключаются в том, что охлаждение шаров производится до температуры выше точки мартенситного превращения, что сказывается на его количестве. Разработанный способ позволяет получать шары с более стабильным высоким качеством за счет изменения размера зерна и однородности структуры.

Получение необходимой структуры шара объясняется тем, что после подстуживания мелющих тел аустенит превращается в перлит по всему объему шара, а дополнительный нагрев позволяет перекристаллизовать полученную структуру еще раз. Вследствие применения такого режима образуется мелкозернистая основа шара. Во время закалки шары приобретают повышенную износостойкость, при этом мелкозернистая структура остается. Конечный отпуск шаров снижает остаточные напряжения и увеличивает их прочность. Данная технология позволяет получить износостойкие мелющие тела, которые хорошо сопротивляются ударным нагрузкам [16].

5. Заключение. Улучшение механических характеристик мелющих тел является актуальной задачей в данный момент. Химический состав и режим термообработки влияют на структуру шара, от которой зависят твердость, прочность и другие характеристики. Рассмотренные исследования позволяют сделать вывод о зависимости характеристик мелющих шаров от химического состава сплава, из которого они сделаны, и от режима термической обработки.

Современные способы исследования зависимостей – это компьютерные модели. При помощи современных программ и экспериментов можно получить модели, которые будут давать результаты, практически неотличимые от результатов физических экспериментов, что сокращает много времени при разработке необходимой технологии получения шаров.

Правильный выбор закалочной среды, температуры закалки и других параметров термообработки существенно влияет на итоговую структуру мелющих шаров. От правильного выбора содержания в стали углерода, кислорода и легирующих элементов также зависит структура и механические характеристики конечного продукта.

Анализ исследований даёт возможность оценить текущее состояние производства мелющих шаров в России и за рубежом. Представленные работы помогают понять данную область и продолжить исследования мелющих тел для получения новых результатов.

В России, СНГ и Китае производство шаров имеет большие объёмы. В этих странах количество шаропркатных станов только растёт, что делает направление исследования шаропркатного производства очень перспективным.

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.
2. Umucu Y., Deniz V. The effect of ball type in fine particles grinding on kinetic breakage parameters. *Inzynieria Mineralna*. 2015;16(1):197–203.
3. Tofil A., Pater Z. Overview of the research on roll forging process. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2017;11(2):72-86.

4. Кузьмин С.О. Влияние режима термоупрочнения на объемную износостойкость мелющих шаров из низколегированных марок стали. *Вестник Приазовского государственного технического университета. Технические науки*. 2011;23:117–126.
5. Рахутин М.Г., Бойко П.Ф. Пути совершенствования методов оценки основных характеристик мелющих шаров. *Уголь*. 2017;12:49–51.
6. Вавилкин Н.М., Челноков В.В. К выбору материала для производства мелющих шаров. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2002;1:41–46.
7. Уманский А.А., Симачев А.С., Думова Л.В., Сафонов С.О. Исследования влияния химического состава рельсовой стали марки К76Ф на ударную стойкость мелющих шаров. *Металлургия: технологии, инновации, качество. Труды XXIII Международной научно-практической конференции в 2-х частях*. Новокузнецк, 323–327, 2022.
8. Уманский А.А., Байдин В.В., Симачев А.С. Исследование влияния химического состава сталей для производства мелющих шаров на их деформационные характеристики. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2024;67(6):637–643. DOI 10.17073/0368-0797-2024-6-637-643
9. 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. DOI 10.57070/2304-4497-2024-1(47)-127-13
10. Шевченко О.И., Лановенко И.Э., Рубцов В.Ю., Опарин А.С. Подстуживание мелющих шаров перед закалкой. Моделирование и эксперимент. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. 2022;24(4):35–40. DOI 10.15593/2224-9877/2022.4.04
11. Папоян Р.С. Исследование процесса закалки и прокаливаемости стальных шаров марки ХГС. *Вестник Национального политехнического университета Армении. Металлургия, материаловедение, недропользование*. 2020;2:31–44.
12. Шевченко О.И., Галимьянов И.К., Шварц Д.Л., Рубцов В.Ю. Моделирование термической обработки мелющих шаров в программных пакетах JMATPRO и Deform. *Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении (ИТММ-2023). Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. Пермь, 329–333, 2023.
13. Rassim Y., Sadeddine A., Bradai M.A., Aissat S., Benabbas A. Investigation on the influence of tempering on microstructure and wear properties of high alloy chromium cast iron. *Advances in Materials Science*. 2021;2(68):65–76.
14. Shi F., Xie W. A specific energy-based size reduction model for batch grinding ball mill. *Minerals*. 2015; 70(20):130–140.
15. Хлыст И.С., Кузьмиченко В.М., Громышев Е.В., Хлыст С.В., Шестаков А.Н., Иванов А.Г. и др. *Способ термической обработки стальных шаров и устройство для закалки стальных шаров*. Патент РФ, № 2766621С1. 2022.
16. Лановенко И.Э., Соколов К.Е., Шведов К.Н., Скороходов А.А., Рубцов В.Ю., Борисов С.В. и др. *Способ производства мелющих шаров из стали*. Патент РФ, № 2804745С1. 2023.

References

1. Krutilin AN, Bestuzhev NI, Bestuzhev AN, Kalenkovich DN. Melyushie tela. Grinding bodies. Problems. Prospects. *Lite i metallurgiya*. 2009;4(53)26–33.
2. Umucu Y, Deniz V. The effect of ball type in fine particles grinding on kinetic breakage parameters. *Inzynieria Mineralna*. 2015;16(1):197–203.
3. Tofil A, Pater Z. Overview of the research on roll forging process. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2017;11(2):72–86.
4. Kuzmin SO. Vliyanie rezhima termouprochneniya na obemnyuyu iznosostoikost melyushih sharov iz nizkolegirovannyh marok stali. [Effect of heat hardening mode on volumetric wear resistance of grinding balls made of low-alloy steel grades.] *Vestnik Priazovskogo tehnologicheskogo universiteta. Inzhenerne nauki*. 2011;23:117–126.
5. Rahutin MG, Boyko PF. Puti sovershenstvovaniya metodov ocenki osnovnyh harakteristik melyushih sharov. [Ways to improve methods for assessing the main characteristics of grinding balls.] *Ugol*. 2017;12:49–51.
6. Vavilkin NM, Chelnokov VV. K vyboru materiala dlya proizvodstva melyushih sharov. [On the selection of material for the production of grinding balls.] *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2002;1:41–46.
7. Umanskiy A.A., Simachev AS, Dumova LV, Safonov SO. Issledovaniya vliyaniya himicheskogo sostava relsovoi stali marki K76F na udarnuyu stoikost melyushih sharov. [Study of the influence of chemical composition of K76F rail steel on the impact resistance of grinding balls.] *Metallurgiya: tehnologii, innovacii, kachestvo. Trudy XXIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferencii v 2-h chastyah*. Novokuznetsk, 323–327, 2022.
8. Umanskiy AA, Baidin VV, Simachev AS. Issledovanie vliyaniya himicheskogo sostava staley dlya proizvodstva melyushih sharov na ih deformacionnye harakteristiki. [Study of the influence of chemical composition of steels for the production of grinding balls on their deformation characteristics.] *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenii. Chernaya metallurgiya*. 2024;67(6):637–643. DOI 10.17073/0368-0797-2024-6-637-643

9. Morozov IS, Umanskiy AA, Protopopov EV, Simachev AS. Sovershenstvovanie tehnologii vyplavki i vnepech- noi obrabotki specializirovannykh konverternykh stalei dlya proizvodstva melyushih sharov. [Improving the technology of smelting and extra-furnace treatment of specialized converter steels for the production of grinding balls.] Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrialnogo universiteta. 2024;1(47):127-134. DOI 10.57070/2304-4497-2024-1(47)-127-13
10. Shevchenko OI, Lanovenko IE, Rubtsov VYu, Oparin AS. Podstuzhivanie melyushih sharov pered zakalkoi. Modelirovanie i eksperiment. [Cooling of grinding balls before hardening. Modeling and experiment.] Vestnik Permskogo nacionalnogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie. 2022;24(4):35-40. DOI 10.15593/2224-9877/2022.4.04
11. Papoyan RS. Issledovanie processa zakalki i prokalivaemosti stalnykh sharov marki HGS. [Study of the process of hardening and hardenability of steel balls of the KhGS brand.] Vestnik Nacionalnogo politehnicheskogo universiteta Armenii. Metallurgiya, materialovedenie, nedropolzovanie. 2020;2:31-44.
12. Shevchenko OI, Galimyanov IK, Shvarts DL, Rubtsov VYu. Modelirovanie termicheskoi obrabotki melyushih sharov v programmykh paketakh JMATPRO i Deform. [Modeling of heat treatment of grinding balls in the JMATPRO and Deform software packages.] Innovacionnye tehnologii v materialovedenii i mashinostroenii (ITMM-2023). Materialy VII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. Perm, 329-333, 2023.
13. Rassim Y, Sadeddine A, Bradai MA, Aissat S, Benabbas A. Investigation on the influence of tempering on microstructure and wear properties of high alloy chromium cast iron. Advances in Materials Science. 2021;2(68):65-76.
14. Shi F, Xie W. A specific energy-based size reduction model for batch grinding ball mill. Minerals. 2015;70(20): 130–140.
15. RU Patent №2766621C1, 2022.03.15. Sposob termicheskoy obrabotki stalnykh sharov i ustroystvo dlya zakalki stalnykh sharov. [Method of heat treatment of steel balls and device for hardening steel balls.] Khlyst IS., Kuzmichenko VM., Gromyshev EV., Khlyst SV., Shestakov AN., Ivanov AG., Kirichenko MN., Pshenichnikov PA.
16. RU Patent №2804745C1, 2023.10.04. Sposob proizvodstva melyushih sharov iz stali. [Ability to produce small balls from steel.] Lanovenko IE., Sokolov KE., Shvedov KN., Skorokhodov AA., Rubtsov VYu., Borisov SV., Kazakovtsev MA., Gaev DV.

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 20.04.2025

Поступила после рецензирования 16.08.2025

Принята к публикации 19.08.2025

Received April 20, 2025

Revised August 16, 2025

Accepted August 19, 2025

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Великородный Павел Сергеевич – аспирант, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Pavel V. Velikorodnyy – Graduate Student, Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

[К содержанию](#)