

Шевченко О.И., Трекин Г.Е., Рубцов В.Ю., Курочкин В.В. Термическая обработка мелющих шаров в условиях нового шаропрокатного стана // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2019. – Т. 21, № 3. – С. 110–117. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.3.13

Shevchenko O.I., Trekin G.E., Rubtsov V.Yu., Kurochkin V.V. Thermal treatment of grinding balls at new ball-rolling shop. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 110–117. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.3.13

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 21, № 3, 2019**

Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science

<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2019.3.13

УДК 621.785.01

О.И. Шевченко¹, Г.Е. Трекин¹, В.Ю. Рубцов^{1,2}, В.В. Курочкин²

¹ Нижнетагильский технологический институт (филиал) Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Нижний Тагил, Россия

² АО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат», Нижний Тагил, Россия

**ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕЛЮЩИХ ШАРОВ В УСЛОВИЯХ НОВОГО
ШАРОПРОКАТНОГО СТАНА**

Представлены экспериментальные данные апробации технологических режимов термической обработки в условиях участка производства мелющих шаров повышенной твердости АО «ЕВРАЗ-НТМК», запущенного в эксплуатацию в 2018 г. На примере производства шаров Ø 120 мм из стальной заготовки марки 55Г за счет изменения температурно-временных параметров термической обработки были получены изделия, соответствующие 3-й группе твердости по ГОСТ 7524–2015, при целевом назначении стали данной марки на 2-ю группу.

Особое внимание уделено возможности изготовления шаров 5-й группы твердости с регламентированной не только поверхностной, но и объемной твердостью. Экспериментальные исследования проведены на сталях марок Ш-3Г и 75ХГФН. Наиболее критичными в плане формирования итоговых свойств являются: температура и характер ее распределения по поверхности заготовки на выходе из стана, время подстуживания, температура заготовки перед подачей в закалочный барабан, а также температура охладителя и время выдержки в закалочном барабане. Получено, что критерию объемной твердости удовлетворяют все режимы из рассмотренных, это свидетельствует о достаточной прокаливаемости сталей. Однако на поверхности и макрошлифах шаров из более легированной стали выявлены трещины, распространяющиеся вглубь металла на глубину до 45–50 мм, что неминуемо приведет к разрушению мелющих тел в процессе эксплуатации.

Возможность массового производства шаров 5-й группы твердости обеспечивается точным соблюдением температурно-временных параметров термической обработки и обуславливается высокой автоматизацией комплекса оборудования, контролем и корректировкой всех технологических параметров в онлайн-режиме. Условия реализации технологических режимов термической обработки мелющих шаров на новом шаропрокатном участке АО «ЕВРАЗ-НТМК» позволяют получать высокую твердость шаров на марках стали меньшего целевого назначения, что показывает его существенный потенциал.

Ключевые слова: термическая обработка, мелющие шары, шаропрокатный стан, нагревательные печи, температурный режим, температурное поле, закалка, прокаливаемость, поверхностная твердость, объемная твердость, трещины, разрушение, макроструктура, ударостойкость.

O.I. Shevchenko¹, G.E. Trekin¹, V.Yu. Rubtsov^{1,2}, V.V. Kurochkin²

¹ Nizhny Tagil's Technology Institute (Department) of Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Eltsin, Nizhny Tagil, Russian Federation

² JSC "EVRAZ Nizhny Tagil Metallurgical Plant", Nizhny Tagil, Russian Federation

THERMAL TREATMENT OF GRINDING BALLS AT NEW BALL-ROLLING SHOP

Experimental data test of heat treatment are presented in conditions of shop production of increased hardness grinding balls on EVRAZ-NTMK, commissioned in 2018. On example of balls Ø 120 mm production from the 55G grade steel billet, by heat treatment changing temperature-time parameters, was obtained products corresponding to 3 grade hardness according to GOST 7524-2015, with intended purpose 2 grade hardness steel.

Particular attention is paid to possibility of making 5th grade hardness balls, with ensured surface and bulk hardness. Experimental studies were carried out on steel grades Ш-3Г and 75ХГФН. The most critical in terms of final properties formation are: the temperature and the nature of its distribution over workpiece surface at ball-rolling mill outlet, the cooling time, the workpiece temperature, before being fed into quenching drum, the cooler temperature and dwell time into quenching drum. It was obtained that all modes, which considered ones satisfy bulk hardness criterion, this indicates a sufficient all steels hardenability. However, on surface and macrosections of balls, which higher alloyed steel, cracks were discovered, that spread deep into the metal at 45 to 50 mm depth, which will inevitably lead grinding media during operation to destruction.

The possibility of mass production 5th grade hardness balls is ensured by exact observance of heat treatment temperature-time parameters and is conditioned by equipment complex high automation, control and all technological parameters correction in the on-line mode. Conditions

for implementation of grinding balls heat treatment technological modes on the new ball rolling shop of JSC "EVRAZ-NTMK" allows to obtain high grades hardness balls on the steel with lower properties, which shows its significant potential.

Keyword: thermal treatment, grinding balls, ball-rolling shop, furnace, thermal mode, thermal field, quenching, volume hardenability, surface hardness, volume hardness, cracks, destruction, macrostructure, impact resistance.

Основными потребителями мелющих шаров являются горно-обогатительные комбинаты черной и цветной металлургии. Планируемое интенсивное развитие металлургической и горнорудной промышленности России, в том числе строительство Удоканского ГОКа с запуском в строй в 2021–2022 гг. [1, 2], требует расширения объема производства мелющих шаров. За последние годы уже запустили в эксплуатацию шаропрокатные станы: «Северсталь» (Череповец), KSP Steel (Павлодар), «УГМК» (Сухой Лог). В 2018 г. введен в эксплуатацию новый стан на «ЕВРАЗ-НТМК» (Нижний Тагил) [3–6]. Данный комплекс предназначен для изготовления высококачественных, закаленных шаров диаметром от 60 до 120 мм, 1–5-й групп твердости, включает в себя участки нагревательных печей, прокатного стана, закалки и отпуска шаров, складирования заготовки и готовой продукции, а также участки подготовки и сопровождения производства.

Исходной заготовкой производства мелющих шаров является круглый прокат соответствующего диаметра, при этом используются низколегированные марки стали, содержание углерода в которых и углеродный эквивалент должны соответствовать значениям табл. 1. Шары 1-й и 2-й групп твердости допускается производить без учета требований по углеродному эквиваленту:

$$C_{\text{эkv}} = C + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Si}}{24} + \frac{\text{Cr}}{5} + \frac{\text{Ni} + \text{Cu}}{40} + \frac{\text{V}}{14},$$

где $C_{\text{эkv}}$ – расчетное значение углеродного эквивалента; C, Mn, Si, Cr, Ni, Cu, V – массовые доли углерода, марганца, кремния, хрома, никеля, меди, ванадия, входящих в состав стали, мас. %.

Нагрев заготовок производят в разделенной на зоны нагревательной печи, причем температура перед подачей в стан должна быть не ниже 1000 °С.

Как показали исследования распределения температурных полей на поверхности шара непосредственно после прокатки (рис. 1, а, б), выявляется существенное повышение температуры от пояса к полюсам с 880 до 940 °С, существенно зависящее от условий деформации заготовки в прокатных валках [6–11]. Обнаруженный прирост температуры (до 60 °С) наблюдается в области внедрения реборды валка в заготовку, где происходят значительные деформации.

После прокатки шары проходят термическую обработку, которая заключается в выравнивании

температуры по всему объему шара в индивидуальной ячейке транспортирующего конвейера, дальнейшей закалке в барабанной установке револьверного типа и отпуске в нагревательной печи.

Таблица 1

Требования к сталям для производства мелющих шаров Ø60–120 мм¹

Диаметр шара, мм	Группа твердости шаров	Массовая доля углерода	Углеродный эквивалент
От 60 до 70	1, 2	0,50	0,70
	3, 4	0,60	0,75
	5	0,60	0,80
От 80 до 120	1, 2	0,50	0,70
	3, 4	0,60	0,75
	5	0,60	0,85

Выравнивание температуры шаров на поверхности и снижение ее до заданных значений (рис. 1, в) осуществляется на конвейере при транспортировке к задающему лотку барабанной установки. Контроль температуры производят как на входе, так и на выходе с конвейера.

По задающему лотку с помощью дозирующего устройства шары распределяются в индивидуальные ячейки барабана, где происходит закалка водой. Вращаясь, барабан обеспечивает вращение и транспортирование шара, исключая образование паровых рубашек. Время нахождения шаров в барабане: для 60–80 мм – 4 мин, для 90–120 мм – 6 мин. Температура шаров после закалочного барабана не превышает 40 °С [12].

После закалки шары подаются в накопитель и затем загружаются в отпускную проходную печь с циркуляционной атмосферой прямого нагрева дымовыми газами. Механизм загрузки шаров на транспортер отпускной печи состоит из рамной конструкции, с помощью которой шары распределяются в ряды, равные ширине транспортера. Отпускная печь состоит из пяти зон нагрева и четырех зон выдержки. Температурный режим в каждой зоне представлен в табл. 2.

После отпуска шары попадают во вращающийся барабан и охлаждаются водой, подаваемой

¹ ГОСТ 7524–2015. Шары мелющие стальные для шаровых мельниц. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2016. 8 с.

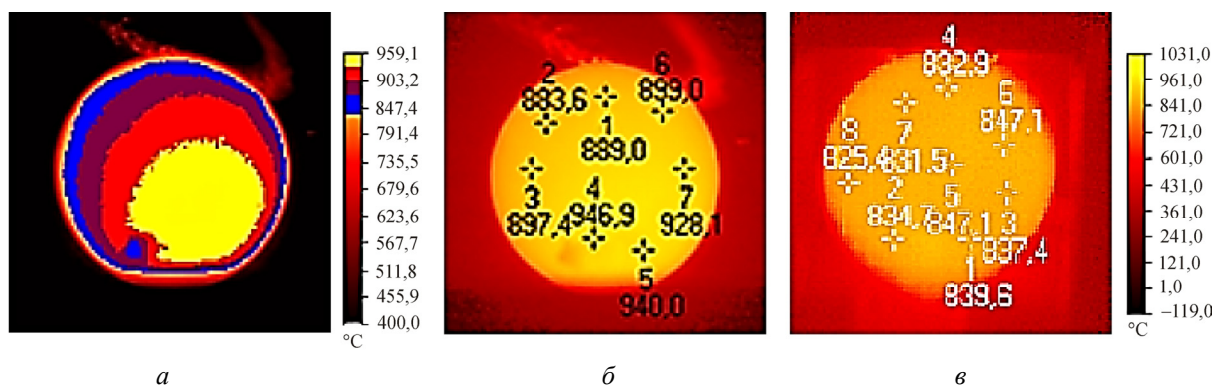


Рис. 1. Температура шара после прокатки: а – температурное поле шара на выходе из стана; б, в – численные значения температур в различных точках поверхности на выходе из стана и после стадии выравнивания

Таблица 2

Температурный режим по зонам отпускной печи

Диаметр шара, мм	Зона нагрева, °C					Зона выдержки, °C			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
60–120	220–350	220–350	220–350	220–350	220–350	Не более			
						220	220	220	220

на них через форсунки системы охлаждения. После охлаждения шары с температурой не более 60 °C из ячейки барабана перекачиваются по лотку в разгрузочный лоток, далее по конвейеру готовой продукции на участок складирования и отгрузки.

Для освоения технологии производства использован круглый прокат Ø120 мм из стали 55Г ($C_{эжв} = 0,75...0,83$), полученный из непрерывно литой заготовки 300×380 мм. На поперечных темплеттах исследовалась глубина закаленного слоя, которая составила 7–12 мм; трещин напряжения и других дефектов не обнаружено (рис. 2). Результаты замера твердости свидетельствуют, что мелющие шары соответствуют 3-й группе твердости (табл. 3). При этом целевое назначение стали 55Г в соответствии с ГОСТ 7524 – для изготовления шаров 1-й или 2-й группы твердости.



Рис. 2. Темплет закаленного шара

Таблица 3

Результаты измерения твердости на поверхности контрольных шаров

Номер образца	Твердость, HRC	
	Поверхность шара	Среднее контрольных шаров
1	51,5–50,5	50,78
2	51,1–50,0	
3	53,7–51,9	52,68
4	53,8–51,3	
5	53,8–46,9	51,50
6	51,7–53,6	

Удельный расход мелющих шаров при измельчении различных руд и материалов напрямую зависит от стойкости шаров, что влияет на затраты на их приобретение. С 2015 г. в ГОСТ 7524–2015 введена 5-я группа твердости, регламентирующая не только твердость поверхности, но и объемную твердость, которая оценивается следующим соотношением:

$$OT = 0,289T_{пов} + 0,436T_{0,25} + 0,203T_{0,5} + 0,063_{0,75} + 0,009T_{ц},$$

где OT – значение показателя объемной твердости, HRC; $T_{пов}$, $T_{0,25}$, $T_{0,5}$, $T_{0,75}$, $T_{ц}$ – значения твердости на поверхности, на расстоянии от поверхности шара в частях радиуса и в центре шара соответственно, HRC.

Кроме объемной твердости, регламентируется химический состав (через углеродный эквивалент), а также геометрические характеристики. На поверхности шаров не допускаются трещины и дефекты, выводящие размеры шаров за предельные отклонения. Дополнительно по требованию потребителя могут вводиться показатели ударостойкости. Это, как правило, копровые испытания. В связи с этим для получения мелющих шаров повышенной твердости с сохранением высоких эксплуатационных свойств на металлургических предприятиях применяются специальные легированные стали [13–16], жестко регламентируются режимы [17–20] термической обработки, в том числе многостадийной [21–23], совершенствуются методы контроля [24, 25], реконструируются производственные мощности [26, 27]. Ключевым на-

правлением является неукоснительное соблюдение температурно-временных параметров в процессе производства.

Возможность получения шаров с гарантированной объемной твердостью исследовалась на четырех сериях изделий из сталей марок Ш-3Г и 75ХГФН. Часть изделий закалены вне комплекса (вручную), с последующим прохождением отпускной печи, другая часть прошла полностью комплекс термообработки на вновь вводимом оборудовании (табл. 4).

Макроструктура выявлялась методом глубокого горячего травления в 50%-ном водном растворе соляной кислоты (рис. 3, а, б). Результаты дюрOMETрического анализа для шаров Ø120 мм с термической обработкой по различным режимам приведены в табл. 5.

Таблица 4

Параметры термообработки опытных образцов

Режимы и условия термической обработки	Номер опытного режима, марка стали			
	№ 1 Ш-3Г	№ 2 75ХГФН	№ 3 Ш-3Г	№ 4 75ХГФН
Условия закалки	Вне комплекса		В закалочном барабане	
Температура шара перед закалкой, °С	840	830	910	920
Температура охладителя (воды), °С	30	30	14	16
Время закалки, мин	3	3	10	10
Температура отпуска, °С	170	170	160	170
Время отпуска, ч	3	3	3	3

Таблица 5

Результаты измерения твердости экспериментальных режимов термической обработки в сравнении с требованиями ГОСТ 7524–2015

Номер опытного режима	Твердость, HRC					
	$T_{\text{пов}}$	$T_{0,25}$	$T_{0,5}$	$T_{0,75}$	$T_{\text{ц}}$	OT
1	54,5	39,25	38	38,75	41	40,85
2	55	51,75	52,25	51,75	53	54,61
3	58	53,25	40	42,25	42,25	51,14
4	55,75	54,25	54,75	55,5	55,0	54,85
Требования ГОСТ 7524–2015	56	–	–	–	–	43

После термической обработки по режимам № 2 и № 4 на поверхности шаров и на макрошлифах выявлены трещины, распространяющиеся вглубь металла на глубину до 45–50 мм. Они имеют извилистые, широко раскрытые края и наиболее выражены на режиме № 4 (рис. 3, б, в).

Критерию объемной твердости удовлетворяют все режимы, за исключением режима № 1, что свидетельствует о хорошей прокаливаемости сталей 75ХГФН и Ш-3Г, достаточной для получения

мелющих шаров 5-й группы при Ø120 мм. Критерию поверхностной твердости полностью удовлетворяет только режим № 3 (сталь Ш-3Г), что подчеркивает важность контроля температуры охладителя при закалке.

Таким образом, возможность массового производства шаров 5-й группы твердости обеспечивается точным соблюдением температурно-временных параметров термической обработки и обуславливается высокой автоматизацией комплекса

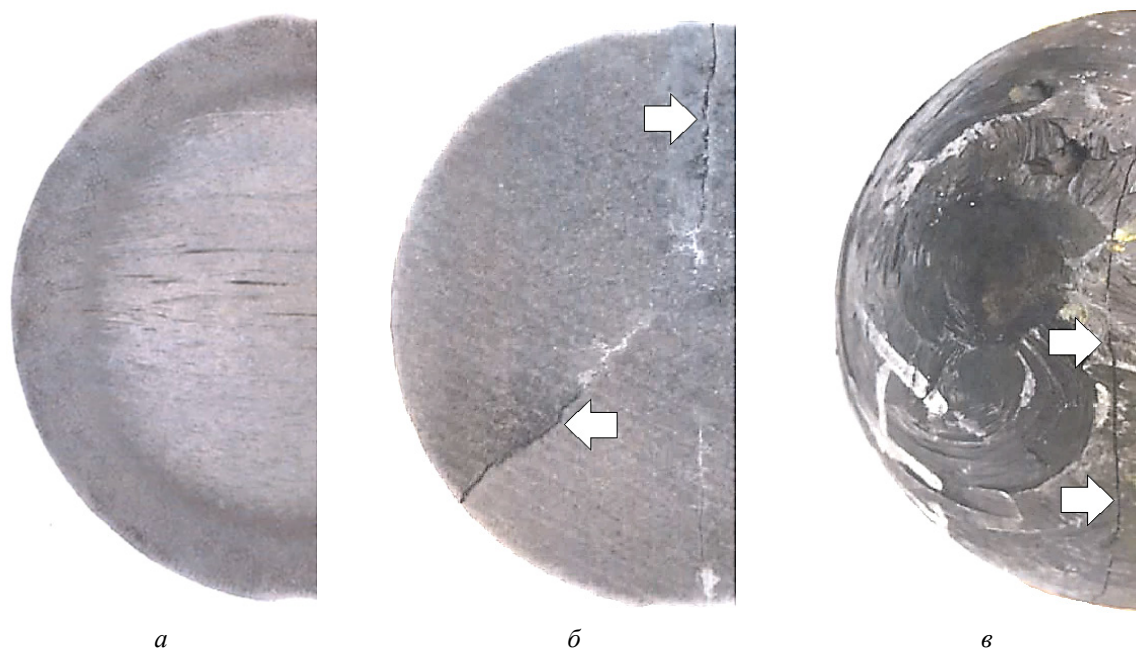


Рис. 3. Макроструктура (а, б) и вид поверхности (в) мелющих шаров с различной термической обработкой: а – сталь Ш-3Г, закалка вне комплекса; б, в – 75ХГФН закалка в барабане. Стрелками обозначены трещины, возникшие в результате термической обработки

оборудования, контролем и корректировкой всех технологических параметров в онлайн-режиме. На настоящем этапе оптимальным вариантом является использование стали Ш-3Г, которая является менее требовательной к деликатности процессов термообработки, также имеет достаточную прокаливаемость и более низкую стоимость. Условия реализации технологических режимов термической обработки мелющих шаров на новом шаропркатном участке АО «ЕВРАЗ-НТМК» позволяют получать высокую твердость шаров на марках стали меньшего целевого назначения, что показывает его существенный потенциал.

Список литературы

1. Задорожный В.Ф., Быбин Ф.Ф. Удоканское месторождение в стратегии освоения севера Забайкалья // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2012. – № 3. – С. 90–94.
2. Романова Д.В., Черненко-Фролова Е.В. Удоканское месторождение как территория экономического развития Забайкальского края // Материалы секционных заседаний 58-й студ. науч.-практ. конф. ТОГУ. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2018. – С. 513–517.
3. Шайбакова Л.Ф., Новоселов С.В. Тенденции, особенности и проблемы развития черной металлургии России // Управление. – 2017. – № 5 (69). – С. 40–49.
4. Сивак Б.А. Сотрудничество металлургов и машиностроителей – основа инновационного развития отрасли // Научно-технический прогресс в черной металлургии: материалы II Междунар. науч.-техн. конф. – Череповец: Изд-во Череповец. гос. ун-та, 2015. – С. 15–17.
5. Состояние производства и пути повышения качества стальных мелющих шаров / Д.В. Сталинский, А.С. Рудюк, В.К. Соленый, А.В. Юдин // Сталь. – 2017. – № 2. – С. 28–34.
6. Рубцов В.Ю., Шевченко О.И. Калибровка шаропркатных валков с непрерывно меняющимся шагом // Черная металлургия. – 2018. – № 8 (1424). – С. 58–63.
7. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T. An innovative method for forming balls by cross rolling // Materials. – 2018. – № 11 (1793). – P. 1–14.
8. Tomczak J., Pater Z., Bartnicki J. Skrew rolling of balls in multiple helical impressions // Archives of Metallurgy and Materials. – 2013. – Vol. 58, iss. 4. – P. 1071–1076.
9. Рубцов В.Ю., Шевченко О.И., Миронова М.В. Совершенствование динамического режима прокатки для повышения стойкости валков шаропркатного стана // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2018. – Т. 61, № 12. – С. 927–932.
10. Рубцов В.Ю., Шевченко О.И., Загребайлов Н.М. Рабочий диапазон параметров шаропркатного стана // Молодежь и наука: материалы междунар. науч.-практ. конф. (25 мая 2018 г.): в 2 т. / М-во образ. и науки РФ; УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Нижнетагил. технол. ин-т (филиал). – Нижний Тагил, 2018. – Т. 1. – С. 18–23.
11. Рубцов В.Ю., Шевченко О.И. Калибровка шаропркатных валков с дифференцированно-изменяющейся глубиной впадины // Молодежь и наука: материалы междунар. науч.-практ. конф. (24 мая 2019 г.): в 2 т. / М-во образ. и науки РФ; УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Нижнетагил. технол. ин-т (филиал). – Нижний Тагил, 2019. – С. 21–24.

12. Курочкин В.В., Шевченко О.И. Освоение технологии термообработки шаров в условиях нового шаропрокатного стана АО «ЕВРАЗ НТМК» // Молодежь и наука: материалы междунар. науч.-практ. конф. (24 мая 2019 г.): в 2 т. / М-во образ. и науки РФ; УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Нижнетагил. технол. ин-т (филиал). – Нижний Тагил, 2019. – С. 24–27.

13. Сталинский Д.В., Рудюк А.С., Солёный В.К. Выбор материала и технологии термической обработки мелющих шаров, работающих преимущественно в условиях абразивного износа // Сталь. – 2017. – № 6. – С. 64–69.

14. Вавилкин Н.М., Челноков В.В. К выбору материала для производства мелющих шаров // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2002. – № 1. – С. 41–46.

15. Основные принципы выбора материалов для изготовления мелющих тел, работающих в условиях ударно-абразивного, ударно-коррозионно-абразивного и ударно-усталостного износа / В.А. Игнатов, В.К. Солёный, В.Л. Жук, А.И. Туяхов // Металл и литье Украины. – 2001. – № 10–11. – С. 31–34.

16. Рубцов В.Ю., Шевченко О.И. Освоение производства мелющих шаров 5 группы твердости в условиях АО «ЕВРАЗ-НТМК» // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тез. докл. 76-й Междунар. науч.-техн. конф. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогор. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. – Т. 1. – С. 117–118.

17. Рубцов В.Ю., Шевченко О.И. Освоение производства мелющих шаров пятой группы твердости в условиях АО «ЕВРАЗ-НТМК» // Калибровочное бюро. – 2018. – № 13. – С. 20–22.

18. Освоение производства мелющих шаров особо высокой твердости диаметром 80–100 мм / А.Б. Юрьев, Н.Х. Мухатдинов, О.П. Атконова, Н.А. Козырев, Л.В. Корнева // Сталь. – 2010. – № 4. – С. 90–91.

19. Производство мелющих шаров особо высокой твердости / Г.В. Мохов, Н.А. Козырев, Е.П. Кузнецов, О.П. Атконова, Е.Г. Закаулов // Металлургия: технологии, управление, инновации, качество: тр. Всерос. науч.-практ. конф. – Новокузнецк, 2009. – С. 204–207.

20. Влияние термической обработки на твердость и износ мелющих шаров / Айшат Сахраю, Садздин Абдельхамид, Брадай Моханд Амокрин, Юнус Рассим, Билек Али, Бенаббас Абдеррахим // МиТОМ. – № 5 (713). – 2017. – С. 34–38.

21. Освоение производства мелющих шаров диам. 30 мм с объемной твердостью не менее 60 HRC / А.Б. Юрьев, Е.П. Кузнецов, О.П. Атконова, И.В. Копылов, Е.Г. Закаулов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2014. – № 6. – С. 42–43.

22. Внедрение технологии трехстадийного термоупрочнения мелющих шаров большого диаметра / В.Г. Ефременко, Е.С. Попов, С.О. Кузьмин, О.И. Труфанова, А.В. Ефременко // Металлург. – 2013. – № 9. – С. 88–92.

23. Кузьмин С.О. Влияние режима термоупрочнения на объемную износостойкость мелющих шаров из низколегированных марок стали // Вісник Приазовського

державного технічного університету. Технічні науки. – 2011. – № 2 (23). – С. 117–126.

24. Рубцов В.Ю., Шевченко О.И. Экспресс-контроль измерения глубины прокаливания мелющих шаров // Молодежь и наука: материалы междунар. науч.-практ. конф. (26 мая 2017 г., г. Нижний Тагил): в 2 т. / М-во образ. и науки РФ, Урал. федер. ун-т им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Нижнетагил. технол. ин-т (филиал). – Нижний Тагил, 2017. – Т. 1. – С. 20–26.

25. Рубцов В.Ю., Шевченко О.И., Трекин Г.Е. Экспресс-контроль качества термической обработки при производстве мелющих шаров // Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов: материалы XXIV Урал. шк. металлосведов-термистов (19–23 марта 2018 г., Магнитогорск). – Магнитогорск: Изд-во Магнитогор. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. – С. 61–62.

26. Качество мелющих шаров, изготовленных разными методами / К.Н. Вдовин, Н.А. Феоктистов, М.Б. Абеннова, В.Д. Куликов, И.С. Кондратьев // Теория и технология металлургического производства. – 2015. – № 1 (16). – С. 78–80.

27. Аникин А.В., Тугушев П.Н., Кузнецов С.А. Разработка и внедрение непрерывной технологии и исследование оборудования для производства мелющих шаров высокой твердости // Неделя металлов в Москве, 11–14 ноября 2014 г.: материалы конф. – М., 2015. – С. 338–348.

References

1. Zadorozhnyi V.F., Bybin F.F. Udokanskoe mestorozhdenie v strategii osvoeniia severa Zabaikal'ia [Udokanskoye field in the strategy of development of the north of Transbaikalia]. *Geologiya i mineral'nosyr'evye resursy Sibiri*, 2012, no. 3, pp. 90–94.

2. Romanova D.V., Chernenko-Frolova E.V. Udokanskoye mestorozhdenie kak territoria ekonomicheskogo razvitiia zabaikal'skogo kraia [Udokanskoye field as an economic development area of the Zabaikalsk region]. *V sbornike: Materialy sektiionnykh zasedanii 58-i studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii TOGU*. Khabarovsk: Izdatel'stvo Tikhookeanskii gosudarstvennyi universitet, 2018, pp. 513–517.

3. Shaibakova L.F., Novoselov S.V. Tendentsii, osobennosti i problemy razvitiia chernoi metallurgii Rossii. [Trends, peculiarities and problems of development of black metallurgy in Russia]. *Upravlenets*, 2017, no. 5(69), pp. 40–49.

4. Sivak B.A. Sotrudnichestvo metallurgov i mashinostroitelei - osnova innovatsionnogo razvitiia otrasli [Cooperation between metallurgists and machine builders is the basis for innovative development of the industry]. *V sbornike: Nauchno-tekhnicheskii progress v chernoi metallurgii Materialy II Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii. Cherepovets: Izdatel'stvo: Cherepovetskii gosudarstvennyi universitet*, 2015, pp. 15–17.

5. Stalinskii D.V., Rudiuk A.S., Solenyi V.K., Iudin A.V. Sostoianie proizvodstva i puti povysheniia kachestva stal'nykh meliushchikh sharov [Production status and ways to improve the quality of steel grinding balls]. *Stal'*, 2017, no. 2, pp. 28–34.

6. Rubtsov V.Iu., Shevchenko O.I. Kalibrovka sharoprokatnykh valkov s nepreryvno meniaiushchimsia shagom [Calibration of spherical rolls with continuously changing pitch]. *Chernaia metallurgii: Biulleten' universiteta "Chermetinformatsiia"*, 2018, no. 8 (1424), pp. 58–63.
7. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T. An Innovative Method for Forming Balls by Cross Rolling. *Materials*, 2018, no. 11, 1793, pp. 1–14.
8. Tomczak J., Pater Z., Bartnicki J. Skrew rolling of balls in multiple helical impressions. *Archives of metallurgy and materials*, 2013, vol. 58, iss. 4, pp. 1071–1076.
9. Rubtsov V.Iu., Shevchenko O.I., Mironova M.V. Sovershenstvovanie dinamicheskogo rezhima prokatki dlia povysheniia stoikosti valkov sharoprokatnogo stana [Improvement of the dynamic mode of rolling to increase the durability of ball rolling mill rolls]. *Izvestiia vuzov. Chernaia metallurgii*, 2018, vol. 61, no. 12, pp. 927–932.
10. Rubtsov V.Iu., Shevchenko O.I., Zagrebailov N.M., Rabochii diapazon parametrov sharoprokatnogo stana [Operating range of ball mill parameters]. *Molodezh' i nauka: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (25 maia 2018 g.)*. Nizhnii Tagil: NTI (filial) UrFU, 2018, vol. 1, pp. 18–23.
11. Rubtsov V. Iu., Shevchenko O. I., Kalibrovka sharoprokatnykh valkov s diferentsirovanno-izmeniaiushcheisia glubinoi vpadiny [Calibration of spherical rolls with a variable depth of depression]. *Molodezh' i nauka: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (24 maia 2019 g.)*. Nizhnii Tagil: NTI (filial) UrFU, 2019, pp. 21–24.
12. Kurochkin V. V. Shevchenko O. I., Osvoenie tekhnologii termoobrabotki sharov v usloviakh novogo sharoprokatnogo stana AO «EVRAZ NTMK» [Development of ball heat treatment technology in the new ball rolling mill of EVRAZ NTMK]. *Molodezh' i nauka: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (24 maia 2019 g.)*. Nizhnii Tagil: NTI (filial) UrFU, 2019, pp. 24–27.
13. Stalinskii D.V., Rudiuk A.S., Solenyi V.K. Vybormateriala i tekhnologii termicheskoi obrabotki meliushchikh sharov, rabotaiushchikh preimushchestvenno v usloviakh abrazivnogo iznosa [Selection of material and technology for heat treatment of grinding balls operating mainly in abrasive wear conditions]. *Stal'*, 2017, no. 6, pp. 64–69.
14. Vavilkin N.M., Chelnokov V.V. K vyboru materiala dlia proizvodstva meliushchikh sharov [To the choice of material for the production of grinding balls]. *Izvestiia vuzov. Chernaia metallurgii*, 2002, no. 1, pp. 41–46.
15. Ignatov V A., Solenyi V.K., Zhuk V.L., Tuiakhov A.I. Osnovnye printsipy vybora materialov dlia izgotovleniia meliushchikh tel, rabotaiushchikh v usloviakh udarno-abrazivnogo, udarno-korroziionno-abrazivnogo i udarnoustalostnogo iznosa [Basic principles of choice of materials for grinding bodies, working in the conditions of shock-abrasive, shock-corrosive-abrasive and shock-fatigue wear]. *Metall i lit'e Ukrainy*, 2001, no. 10–11, pp. 31–34.
16. Rubtsov V.Iu., Shevchenko O.I. Osvoenie proizvodstva meliushchikh sharov 5 gruppy tverdosti v usloviakh AO «EVRAZ-NTMK» [Development of production of grinding balls of the 5th hardness group in the conditions of EVRAZ-NTMK]. *Aktual'nye problemy sovremennoi nauki, tekhniki i obrazovaniia: tezisy dokladov 76-i mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. Magnitogorsk, 2018, vol. 1, pp. 117–118.
17. Rubtsov V.Iu., Shevchenko O.I. Osvoenie proizvodstva meliushchikh sharov piatoi gruppy tverdosti v usloviakh AO «EVRAZ-NTMK» [Development of production of grinding balls of the fifth hardness group in the conditions of EVRAZ-NTMK]. *Kalibrovochnoe biuro*, 2018, no. 13, pp. 20–22.
18. Iur'ev A.B., Mukhatdinov N.Kh., Atkonova O.P., Kozyrev N.A., Korneva L.V. Osvoenie proizvodstva meliushchikh sharov osobo vysokoi tverdosti diametrom 80–100 mm. [Development of production of grinding balls of especially high hardness with diameter of 80–100 mm]. *Stal'*, 2010, no. 4, pp. 90–91.
19. Mokhov G.V., Kozyrev N.A., Kuznetsov E.P., Atkonova O.P., Zakaulov E.G. Proizvodstvo meliushchikh sharov osobo vysokoi tverdosti // Metallurgii: upravlenie, innovatsii, kachestvo: Trudy Vserossiiskoi nauchno-prakt. Konferentsii. Novokuznetsk, 2009. S. 204–207.
20. Aisat Sakhraiu, Sadzddin Abdel'khamid, Bradai Mokhand Amokran, Iunus Rassim, Bilek Ali, Benabbas Abderrakhim. Vliianie termicheskoi obrabotki na tverdest' i iznos meliushchikh sharov [Manufacture of grinding balls of particularly high hardness]. *MiTOM*, no. 5(713), 2017, pp. 34–38.
21. Iur'ev A.B., Kuznetsov E.P., Atkonova O.P., Kopylov I.V., Zakaulov E.G. Osvoenie proizvodstva meliushchikh sharov diam. 30 mm s ob'emnoi tverdest'iu ne menee 60HRC [Mastering of production of grinding balls 30 mm diameter with the volume hardness not less than 60 HRC]. *Chernaia metallurgii. Biulleten' NTIChM*, 2014, no. 6, pp. 42–43.
22. Efremenko V.G., Popov E.S., Kuz'min S.O., Trufanova O.I., Efremenko A.V. Vnedrenie tekhnologii trekhstadiinogo termouprochneniia meliushchikh sharov bol'shogo diametra [Introduction of three-stage thermal hardening technology for large-diameter grinding balls]. *Metalurg*, 2013, no. 9, pp. 88–92.
23. Kuz'min S.O. Vliianie rezhima termouprochneniia na ob'emnuu iznosostoikost' meliushchikh sharov iz nizkolegirovannykh marok stali [Influence of thermal hardening on the volume wear resistance of grinding balls made of low-alloy steel grades]. *Visnik priazov'skogo derzhavnogo tekhnicheskogo universitetu. Serii: Tekhnichni nauki*, 2011, no. 2(23), pp. 117–126.
24. Rubtsov V.Iu., Shevchenko O.I. Ekspres-kontrol' izmereniia glubiny prokalivaniia meliushchikh sharov [Rapid monitoring of ignition depth measurement of grinding balls]. *Molodezh' i nauka: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (26 maia 2017 g.)*. Nizhnii Tagil: NTI (filial) UrFU, 2017, vol. 1, pp. 20–26.
25. Rubtsov V.Iu., Shevchenko O.I., Trekin G.E. Ekspres kontrol' kachestva termicheskoi obrabotki pri proizvodstve meliushchikh sharov [Express quality control of heat treatment in the production of grinding balls]. *Aktual'nye problemy fizicheskogo metallovedeniia stali i splavov: materialy XXIV Ural'skaia shkola metallovedov-termistov*. Magnitogorsk, 2018, pp. 61–62.
26. Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Abenova M.B., Kulikov V.D., Kondrat'ev I.S. Kachestvo meliushchikh

sharov, izgotovlennykh raznymi metodami [Quality of grinding balls made by different methods]. *Teoriia i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*, 2015, no. 1(16), pp. 78-80

27. Anikin A.V., Tugushev P.N., Kuznetsov S.A. Razrabotka i vnedrenie nepreryvnoi tekhnologii i issledovanie oborudovaniia dlia proizvodstva meliushchikh sharov vysokoi tverdosti [Development and implementation of continuous technology and research of equipment for the production of grinding balls of high hardness]. *Nedelia metallov v Moskve, 11-14 noiabria 2014 g. Sbornik trudov konferentsii*. Moscow, 2015, pp. 338–348.

Получено 09.07.19

Опубликовано 26.09.19

Сведения об авторах

Шевченко Олег Игоревич (Нижний Тагил, Россия) – доктор технических наук, доцент, завкафедрой металлургических технологий Нижнетагильского технологического института (филиала) Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; e-mail: shevchenko_oleg@mail.ru.

Трекин Григорий Евгеньевич (Нижний Тагил, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры общего машиностроения Нижнетагильского технологического института (филиала) Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; e-mail: trekin1963@yandex.ru.

Рубцов Вячеслав Юрьевич (Нижний Тагил, Россия) – аспирант Нижнетагильского технологического института (филиала) Уральского федерального универ-

ситета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, калибровщик рельсобалочного цеха АО «ЕВРАЗ-Нижнетагильский металлургический комбинат»; e-mail: uriyot@mail.ru.

Курочкин Вячеслав Валерьевич (Нижний Тагил, Россия) – калибровщик крупносортового цеха АО «ЕВРАЗ-Нижнетагильский металлургический комбинат»; e-mail: Vyacheslav.Kurochkin@evraz.com.

About the authors

Oleg I. Shevchenko (Nizhny Tagil, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department Metallurgical Technologies, Nizhny Tagil Technology Institute (Department) of Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Eltsin; e-mail: shevchenko_oleg@mail.ru.

Grigoriy E. Trekin (Nizhny Tagil, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Senior Reseacher, Center for Research and Innovation, Nizhny Tagil Technology Institute (Department) of Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Eltsin; e-mail: trekin1963@yandex.ru.

Vyacheslav Yu. Rubtsov (Nizhny Tagil, Russian Federation) – Postgraduate Student, Nizhny Tagils Technology Institute (Department) of Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Eltsin; e-mail: uriyot@mail.ru; Roll Pass Designer, JSC “EVRAZ Nizhny Tagil Metallurgical Plant” (EVRAZ NTMK).

Vyacheslav V. Kurochkin (Nizhny Tagil, Russian Federation) – Roll Pass Designer, JSC “EVRAZ Nizhny Tagil Metallurgical Plant” (EVRAZ NTMK); e-mail: Vyacheslav.Kurochkin@evraz.com.