РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ И УДЕЛЬНЫХ ОБЖАТИЙ ПРИ ПРОКАТКЕ МЕЛЮЩИХ ШАРОВ

*В. Ю. РУБЦОВ^{1,2}, калибровщик рельсобалочного цеха, аспирант, Uriylot@mail.ru;
О. И. ШЕВЧЕНКО³, д-р техн. наук, заведующий кафедрой металлургических технологий;
В. В. КУРОЧКИН¹, калибровщик крупносортового цеха;*

А. С. ОПАРИН¹, инженер-технолог центральной лаборатории

(¹ АО "ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат", Россия, г. Нижний Тагил;

² Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия,

г. Екатеринбург; ³ Нижнетагильский технологический институт (филиал) Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, г. Нижний Тагил)

Аннотация. При производстве мелющих шаров высокой твердости ключевым является неукоснительное соблюдение параметров процесса. Одним из основных параметров является распределение температурных полей и равномерность удельных обжатий при прокатке мелющих шаров высокой твердости. Усилия обжатия можно оценить моделированием, но в данном случае они определены аналитически, исходя из зависимости распределения по наблюдаемым температурным полям на поверхности шара. Предложена методика и произведен на примере прокатки условного шара диам. 60 мм расчет усилий обжатия по фиксированным точечным температурам, составлен график зависимости, показывающий изменение удельного усилия прокатки. Выявлено существенное повышение температуры шара при поперечно-винтовой прокатке от пояска к полюсам с 880 до 940 °С. Установленный прирост температуры (до 60 °С) наблюдается в области внедрения реборды вала в заготовку, где происходят значительные деформации. Определено максимальное удельное усилие прокатки, создаваемое на вершине реборд валков, которое достигает 350 МПа и линейно снижается по мере удаления от вершины реборды инструмента деформации и практически сводится к нулю на пояске шара. Показано, что линейный характер изменения удельного усилия прокатки хорошо согласуется с линейной зависимостью роста реборды прокатного вала при ее внедрении в заготовку.

Ключевые слова: прокатка мелющих шаров высокой твердости, поперечно-винтовая прокатка, максимальное обжатие, удельное усилие прокатки, распределение усилий прокатки, распределение температурных полей.

Ссылка для цитирования: Рубцов В.Ю., Шевченко О.И., Курочкин В.В., Опарин А.С. Распределение температурных полей и удельных обжатий при прокатке мелющих шаров // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75. № 7. С. 834–839.

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-7-834-839

DISTRIBUTION OF TEMPERATURE FIELDS AND SPECIFIC REDUCTIONS AT GRINDING BALLS ROLLING

V. YU. RUBTSOV^{1,2}, calibrator of the rail and beam shop, postgraduate, Uriylot@mail.ru;

O. I. SHEVCHENKO³, HD (Tech), Head of Dpt "Metallurgical technologies";

V. V. KUROCHKIN¹, calibrator of the large size profiles shop;

A. S. OPARIN¹, engineer-technologist of the central laboratory

(¹ JSC "EVRAZ Nizhny Tagil steel-works", Russia, Nizhny Tagil;

² Ural Federal University after the First President of Russia B.N. El'tsin, Russia, Ekaterinburg;

³ Nizhny Tagil Technological Institute (branch), Ural Federal University after the First President of Russia B.N. El'tsin, Russia, Ekaterinburg)

Abstract. During the high hardness grinding balls production the following to the process parameters is the key requirement. The temperature and the deformation uniformity are main parameters at the high hardness grinding balls rolling. Reduction forces can be estimated by modeling, but in this case, they were determined analytically, based on the distribution of the real specific reduction force over the observed temperature fields on the surface of the ball. Revealed a significant increase in the temperature of ball during the cross-helical rolling from equator to the poles from 880 °C to 940 °C. Established temperature increase (up to 60 °C) was observed in the area of the roll flange penetration into the workpiece, where significant deformations occur. Maximum average power of rolling generated on the top of the roll flanges has been determined, which reaches 350 MPa and decreases linearly with the distance from the top of the flange of the deformation tool and is practically reduced to zero on the equator of the ball. It was shown

that linear nature of the change of the specific power of rolling is in good agreement with the linear dependence of the mill roll flange growth when it is introduced into the workpiece.

Keywords: rolling of high hardness grinding balls, helical-cross rolling, maximum reduction, specific rolling force, distribution of rolling force, distribution of temperature fields.

For citation: Rubtsov V.Yu., Shevchenko O.I., Kurochkin V.V., Oparin A.S. Distribution of temperature fields and specific reductions at grinding balls rolling. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2019, vol. 75, no. 7, pp. 834–839. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-7-834-839

В связи с повышением требований к качеству производимых мелющих шаров с 2015 г. в классификацию мелющих шаров по группам твердости ГОСТ 7524–2015 введена 5-я группа, характеризующаяся высокой поверхностной и нормированной объемной твердостью [1].

Для получения мелющих шаров повышенной твердости с сохранением высоких эксплуатационных свойств на металлургических предприятиях:

- разрабатываются специальные легированные стали [2];
- жестко регламентируются режимы термической обработки [3–6];
- реализуются процессы многостадийной термообработки [7];
- совершенствуются методы контроля [8, 9];
- производится реконструкция производственных мощностей [10, 11].

Из перечисленных направлений работы ключевым на сегодняшний день при производстве мелющих шаров высокой твердости является неукоснительное соблюдение температурно-временных параметров в процессе производства.

Исследование температурных полей и расчет удельных обжатий при прокатке мелющих шаров производились в процессе изготовления шара диам. 60 мм. Размеры заготовки: длина — 6 м, диаметр — 60 мм, материал — сталь условной марки ШЗ-Г ($C = 0,7–0,75\%$; $Si = 0,17–0,37\%$; $Mn = 0,9–1,2\%$; $S < 0,025\%$; $P < 0,025\%$). Температура заготовки перед подачей в клеть составляла $1010–1120\text{ }^{\circ}\text{C}$ и определялась по показаниям пирометра СЕМ DT-8833 480717 с точностью измерения $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ при температурах $< 1370\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температурное поле на поверхности шара после прокатки на выходе из стана измерялось при помощи тепловизора Fluke Ti400 с погрешностью измерения $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ при диапазоне измеряемых температур $< 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В последнее время, согласно публикациям [12–18], осуществляются попытки расчета температур и усилий прокатки при помощи симуляции процесса прокатки шаров в программных комплексах Q-Form, Deform 3D, SuperForm и т. п., однако экспериментальные подтверждения расчетных параметров на настоящий момент отсутствуют. Поэтому чаще всего производится аналитический расчет усилий при поперечно-винтовой прокатке мелющих шаров согласно ме-

тодике [19]. По данной методике определяются площадь контактной поверхности между вальками и заготовкой в различные моменты прокатки и среднее контактное давление, затем рассчитывается общее усилие прокатки. Методика предполагает учет распределения усилий по длине бочки валька на участках обжатия, однако распределение усилий обжатия на каждом из участков (расчетных площадей контакта) не предусмотрено.

Целью данного исследования является определение неравномерности обжатий, определяемых из разности температур по поверхности шара после прокатки, а также критериев зависимости данных параметров.

Как показало исследование распределения температурных полей на поверхности шара непосредственно после прокатки (рис. 1), выявляется существенное повышение температуры от пояска к полюсам с 880 до $940\text{ }^{\circ}\text{C}$. Обнаруженный прирост температуры (до $60\text{ }^{\circ}\text{C}$) наблюдается в области внедрения реборды валька в заготовку, где происходят значительные деформации. Предлагается, учитывая изменение температур при прокатке, теоретически установить изменение усилий обжатия в конкретных точках и определить распределение усилий обжатий по поверхности шара с возрастанием от пояска к полюсам (рис. 2).

Рис. 1. Температура шара после прокатки на выходе из стана:
а — распределение температурных полей;
б — численные значения температур в различных точках поверхности шара

Fig. 1. Ball temperature after rolling at the mill exit:
а — distribution of temperature fields;
б — numeral values of the temperature in various points of the ball surface

Рис. 2. Схема расположения шара и инструмента относительно инструмента деформации на выходе из клетки:

A — шар; 1 — полюс; 2 — пояс (экватор);
Б — инструмент деформации (прокатные валки);
В — условная шкала удаления расчетной точки от полюса шара

Fig. 2. Diagram of the ball and instrument location relating deformation instrument at the stand exit:

A — the ball; 1 — the pole; 2 — shoulder (equator);
Б — deformation instrument (rolling rollers); В — conditional scale of calculated point moving away from the ball pole

Известно, что потеря температуры происходит за счет конвекционного тепловыделения, излучения и контактной потери тепла с валками, а приращение тепла — за счет деформации. Изменение температур в ходе прокатки, определяемое по методике [20], составит:

$$t_i = t_{i-1} - \Delta t_{\text{и}} - \Delta t_{\text{к}} - \Delta t_{\text{в}} + \Delta t_{\text{д}}, \quad (1)$$

где t_{i-1} — температура начального нагрева заготовки, °С; $\Delta t_{\text{и}}$ — потери температуры заготовки за счет излучения тепловой энергии, °С; $\Delta t_{\text{к}}$ — потери температуры заготовки за счет конвективного теплообмена полосы с окружающей средой, °С; $\Delta t_{\text{в}}$ — потери температуры за счет контактного теплообмена с рабочими валками, °С; $\Delta t_{\text{д}}$ — разогрев полосы за счет энергии пластического формоизменения в очаге деформации, °С.

Потеря температуры заготовки за счет излучения тепловой энергии в межклетевом промежутке определяется по закону Стефана–Больцмана:

$$\Delta t_{\text{и}} = \frac{C_p F \tau}{Gc} \left[\left(\frac{t_{i-1} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_c + 273}{100} \right)^4 \right], \quad (2)$$

где G — масса металла заготовки, кг; F — излучающая поверхность заготовки, м²; τ — время прокатки, с; c — теплоемкость материала заго-

товки, Дж/(кг·°С); для стали, по данным работы [21], $c = 0,228t + 455$; t_c — температура окружающего воздуха, °С; C_p — приведенный коэффициент излучения системы взаимнооблучающихся тел:

$$C_p = \xi C_0,$$

где ξ — степень оптической чистоты поверхности; C_0 — постоянная Стефана–Больцмана.

$$\Delta t_{\text{к}} = \frac{\alpha_{\text{к}} F \tau (t_{i-1} - t_c)}{Gc}, \quad (3)$$

где $\alpha_{\text{к}}$ — коэффициент теплоотдачи между металлом и окружающей средой, Вт/(м²·°С):

$$\alpha_{\text{к}} = \frac{\text{Nu} \lambda_b}{d_p}, \quad (4)$$

где Nu — критерий Нуссельта; λ_b — коэффициент теплопроводности воздуха; d_p — приведенный диаметр заготовки.

Критерий Нуссельта при отношении ширины раската к высоте, равном единице, определяется по следующим зависимостям:

$$\text{Nu} = \begin{cases} 0,52 \text{Re}^{0,47} \phi, & \text{Re} \in [10, 1000] \\ 0,18 \text{Re}^{0,62} \phi, & \text{Re} \in [1000, 100000], \end{cases} \quad (5)$$

где ϕ — функция угла атаки полосы воздушным потоком; Re — критерий Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{v d_p}{\nu_b}, \quad (6)$$

где v — скорость перемещения заготовки; ν_b — кинематическая вязкость воздуха.

$$\Delta t_{\text{в}} = \frac{\alpha_b F_{\text{п}} \tau (t_{i-1} - t_b)}{G_d c}, \quad (7)$$

где α_b — коэффициент теплоотдачи между заготовкой и рабочими валками, Вт/(м²·°С):

$$\alpha_b = \frac{\lambda_c}{d_p},$$

где λ_c — коэффициент теплопроводности стали; $F_{\text{п}}$ — полная площадь контакта металла с рабочими валками в очаге деформации; τ — время контакта заготовки с валками; G_d — масса металла, находящаяся в очаге деформации, в зависимости от длины рабочей поверхности вала; t_{i-1} — температура заготовки при входе в клет; t_b — температура рабочих валков.

$$\Delta t_{\text{д}} = \frac{P_c \varepsilon}{c \rho}, \quad (8)$$

где P_c — среднее удельное усилие прокатки; ε — логарифмическая степень деформации, при производстве шаров условно весь металл идет в вытяжку, поэтому согласно методике [19] принимается равной единице.

Прирост температуры, определяемый по формуле (8), на шаре происходит только за счет деформации. Все остальные процессы приводят к потере температуры. Из уравнения теплового

баланса (1) и уравнения прироста температур за счет деформации (8) выражаем величину удельного давления P_c :

$$P_c = (t_i - t_{i-1} + \Delta t_k + \Delta t_{\text{и}} + \Delta t_{\text{в}}) \frac{c \rho}{\varepsilon}. \quad (9)$$

В таблице представлены исходные данные для расчета.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ПРИ ОПЫТНОЙ ПРОКАТКЕ

STARTING DATA AT THE TEST ROLLING

Показатель	Значение
Температура нагрева заготовки t_{i-1} , °C	1010
Приведенный диаметр заготовки d_p , м	0,06
Длина заготовки L , м	6
Излучающая поверхность заготовки F , м ²	1,137
Масса заготовки G , кг	132,5
Плотность стали ρ , кг/м ³	7810
Время процесса прокатки T , с	55
Температура окружающего воздуха t_c , °C	20
Коэффициент теплопроводности воздуха при 293 К λ_b , Вт/(м·°C)	0,0259
Степень оптической чистоты поверхности для низколегированной стали ξ	0,85
Функция угла атаки полосы воздушным потоком при прокатке φ	0,5
Скорость перемещения заготовки v , м/с	0,18
Кинематическая вязкость воздуха при 20 °C ν_b , м ² /с×10 ⁻⁶	18,1
Коэффициент теплопроводности материала заготовки λ_c , Вт/(м·K)	47
Полная площадь контакта металла с рабочими валками в очаге деформации $F_{\text{п}}^*$, м ²	0,00601
Длина рабочей поверхности вала l , м	0,35
Масса металла, находящаяся в очаге деформации, G_d , кг	7,73
Температура рабочих валков t_b , °C	80–120
Логарифмическая степень деформации ε	1

* Для шара полная площадь контакта составит 0,00601 м² (рассчитано ранее в работе [21]).

Находим P_c для каждой температуры из рис. 1 и получаем зависимость распределения удельного усилия прокатки по удалению от полюса шара (рис. 3).

Рис. 3. Зависимости распределения удельного усилия прокатки по удалению от полюса

Fig. 3. Dependence of the specific rolling force distribution while moving away from the pole

Как видно из рис. 3, максимальное обжатие приходится на полюс шара, что соответствует расчетному удельному усилию 350 МПа.

Удельное усилие прокатки снижается по мере удаления от вершины реборды инструмента деформации и практически сводится к нулю на пояске шара, что показывает отсутствие обжатий в данной зоне.

Расчетные данные согласуются с линейным графиком роста реборды прокатного вала.

Вывод

Таким образом, выявлено существенное повышение температуры шара при поперечно-винтовой прокатке от пояски к полюсам с 880 до 940 °C. Обнаруженный прирост температуры (до 60 °C) наблюдается в области внедрения реборды вала в заготовку, где происходят значительные деформации.

По точечным температурам поверхности шара на выходе из клетки аналитически определено распределение удельных усилий.

Максимальное удельное усилие прокатки при производстве шара diam. 60 мм составляет 350 МПа и линейно снижается по мере удаления от вершины реборды инструмента деформации, причем практически сводится к нулю на пояске

шара. Линейный характер изменения удельного усилия хорошо согласуется с линейной зависимостью роста реборды прокатного вала при ее внедрении в заготовку.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 7524–2015. Шары мелющие стальные для шаровых мельниц.
2. Рубцов В.Ю., Шевченко О.И. Освоение производства мелющих шаров пятой группы твердости в условиях АО “ЕВРАЗ-НТМК” // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 76-й Междунар. научно-технич. конф. — Магнитогорск: изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2018. Т. 1. С. 117, 118.
3. 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.
4. Юрьев А.Б., Мухатдинов И.Х., Атконова О.П. и др. Освоение производства мелющих шаров особо высокой твердости диаметром 80–100 мм // Сталь. 2010. № 4. С. 90, 91.
5. Производство мелющих шаров особо высокой твердости / Мохов Г.В. и др. // Металлургия: технологии, управление, инновации, качество: труды всерос. научно-практич. конф. — Новокузнецк, 2009. С. 204–207.
6. Сахраю Айшат, Абдельхамид Садэдин, Моханд Амокрэн Брадай и др. Влияние термической обработки на твердость и износ мелющих шаров // Металловедение и термическая обработка металлов. 2017. № 5. С. 34–38.
7. Юрьев А.Б., Кузнецов Е.П., Атконова О.П. и др. Освоение производства мелющих шаров diam. 30 мм с объемной твердостью не менее 60HRC // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2014. № 6. С. 42, 43.
8. Рубцов В.Ю., Шевченко О.И. Экспресс-контроль измерения глубины прокаливания мелющих шаров // Молодежь и наука: материалы междунар. научно-практич. конф. (26 мая 2017 г., г. Нижний Тагил). — Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2017. Т. 1. С. 20–26.
9. 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 Уральской школы металловедов-термистов (19–23 марта 2018 г., Магнитогорск) / Отв. ред. М.В. Чукин, А.Н. Емелюшин. — Магнитогорск: изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2018. С. 61, 62.
10. 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.: сб. трудов конференции. — М., 2015. С. 338–348.
11. Ефременко В.Г., Попов Е.С., Кузьмин С.О. и др. Внедрение технологии трехстадийного термоупрочнения мелющих шаров большого диаметра // Металлург. 2013. № 9. С. 88–92.
12. Pater Z., Tomaczak J., Bartnicki J. etc. Experimental and numerical analysis of helical-wedge rolling process for producing steel balls // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2013. V. 67. P. 1–7.
13. Tofil A., Pater Z. Overview of the research on roll forging processes // Advances in Science and Technology Research Journal. 2017. V. 11. № 2. P. 72–86.
14. Pater Z. FEM Analysis of the Multi-Wedge Helical Rolling Process for a Workholding Bolt // MATEC Web of Conferences. 2016. V. 80. P. 130, 131.
15. Wang M.H., Xiang D., Xiao C., Zhou J., Jia Z. Influence of cooling condition of tools on central deformation of workpiece and tool wear in cross wedge rolling // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2012. V. 59. № 5. P. 473–482.
16. Филиппова М.В., Темлянец М.В., Перетягко В.Н., Прудский Е.Е. Математическое моделирование прокатки шаров // Изв. вузов. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 7. С. 516–521.
17. Chila P., Pater Z., Tomczak J., Chila P. Numerical analysis of rolling process for producing steel balls using helical rolls // Archives of Metallurgy and Materials. 2016. V. 61. № 2. P. 485–492.
18. Pater Z. Analysis of helical rolling process of balls formed from a head of a scrapper rail // Advances in Science and Technology Research Journal. 2016. V. 10. № 30. P. 110–114.
19. Целиков А.И., Барбарич М.В. Специальные прокатные станы. — М.: Металлургия, 1971. — 336 с.
20. Дубинский Ф.С., Соседкова М.А. Методы проектирования температурных режимов горячей сортовой прокатки: учебное пособие. — Челябинск: изд-во ЮУрГУ, 2007. — 18 с.
21. Рубцов В.Ю., Шевченко О.И., Миронова М.В. Совершенствование динамического режима прокатки для повышения стойкости валков шаропрокатного стана // Изв. вузов. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 12. С. 927–932.

Поступила 25 апреля 2019 г.

REFERENCES

1. GOST 7524–2015 Shary melyushchie stal'nye dlya sharovykh mel'nits [State Standard 7524–2015. Steel grinding balls for ball mills]. (In Russ.).
2. Rubtsov V.Yu., Shevchenko O.I. Osvoenie proizvodstva melyushchikh sharov pyatoi gruppy tverdsti v usloviyakh AO “EVRAZ-NTMK” [Mastering production of grinding balls of 5th group of hardness at JSC “EVRAZ-NTMK”]. Aktual'nye problemy sovremennoi nauki, tekhniki i obrazovaniya: tezisy dokladov 76-i Mezhdunar. nauchno-tekhnich. konf. [Actual problems of modern science, technology and education: theses of reports of the 76th Mezhdunar. scientific and technical conf.]. Magnitogorsk: izd-vo MG TU im. G.I. Nosova, 2018, vol. 1, pp. 117, 118. (In Russ.).

3. Rubtsov V.Yu., Shevchenko O.I. Mastering production of grinding balls of 5th group of hardness at JSC "EVRAZ-NTMK". *Kalibrovchnoe byuro*, 2018, no. 13, pp. 20–22. (In Russ.).
4. Yur'ev A.B., Mukhatdinov I.Kh., Atkonova O.P., Kozyrev N.A., Korneva L.V. Mastering production of super high hardness grinding balls of 80–100 mm diameter. *Stal'*, 2010, no. 4, pp. 90, 91. (In Russ.).
5. Mokhov G.V. etc. *Proizvodstvo melyushchikh sharov osobo vysokoi tverdosti* [Production of super high hardness grinding balls]. *Metallurgiya: tekhnologii, upravlenie, innovatsii, kachestvo: trudy vsenos. nauchno-praktich. konf.* [Metallurgy: technology, management, innovation, quality: the works of All-Russia. scientific and practical conf.]. Novokuznetsk, 2009, pp. 204–207. (In Russ.).
6. Sakhray Aisat, Abdel'khamid Sadeddin, Mokhand Amokran Bradai, Rassim Yunus, Ali Bilek, Abderrakhim Benabbas. Influence of thermal treatment on the hardness and wear of grinding balls. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2017, no. 5, pp. 34–38. (In Russ.).
7. Yur'ev A.B., Kuznetsov E.P., Atkonova O.P., Kopylov I.V., Zakaulov E.G. Mastering production of 30 mm diameter grinding balls with volume hardness more than 60HRC. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2014, no. 6, pp. 42, 43. (In Russ.).
8. Rubtsov V.Yu., Shevchenko O.I. *Ekspress-kontrol' izmereniya glubiny prokalivaniya melyushchikh sharov* [Express-control of measuring of grinding ball calcination depth]. *Molodezh' i nauka: materialy mezhdunar. nauchno-praktich. konf. (26 maya 2017, Nizhnii Tagil)* [Youth and science: materials of the Intern. scientific and practical conf. (May 26, 2017, Nizhny Tagil)]. Nizhnii Tagil: NTI (filial) UrFU, 2017, vol. 1, pp. 20–26. (In Russ.).
9. Rubtsov V.Yu., Shevchenko O.I., Trekin G.E. *Ekspress-kontrol' kachestva termicheskoi obrabotki pri proizvodstve melyushchikh sharov* [Express-control of quality of thermal treatment at grinding balls production]. *Aktual'nye problemy fizicheskogo metallovedeniya stali i splavov: materialy XXIV Ural'skoi shkoly metallovedov-termistov (19–23 marta 2018, Magnitogorsk)* [Actual problems of physical metallurgy of steels and alloys: materials of the XXIV Ural School of Metalworking Thermists (March 19–23, 2018, Magnitogorsk)]. Chukin M.V., Emelyushin A.N. ed. Magnitogorsk: izd-vo MGTU im. G.I. Nosova, 2018, pp. 61, 62. (In Russ.).
10. Anikin A.V., Tugushev P.N., Kuznetsov S.A. *Razrabotka i vnedrenie nepreryvnoi tekhnologii i issledovanie oborudovaniya dlya proizvodstva melyushchikh sharov vysokoi tverdosti* [Elaboration and implementation of continuous technology and study of equipment for production of high hardness grinding balls]. *Nedelya metallov v Moskve, 11–14 noyabrya 2014: sb. trudov konferentsii* [Metal Week in Moscow, November 11–14, 2014: Sat. conference proceedings]. Moscow, 2015, pp. 338–348. (In Russ.).
11. Efremenko V.G., Popov E.S., Kuz'min S.O., Trufanova O.I., Efremenko A.V. Implementation of technology of three-stage thermal treatment of big diameter grinding balls. *Metallurg*, 2013, no. 9, pp. 88–92. (In Russ.).
12. Pater Z., Tomaczak J., Bartnicki J. etc. Experimental and numerical analysis of helical-wedge rolling process for producing steel balls. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, vol. 67, pp. 1–7.
13. Tofil A., Pater Z. Overview of the research on roll forging processes. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 2017, vol. 11, no. 2, pp. 72–86.
14. Pater Z. FEM Analysis of the Multi-Wedge Helical Rolling Process for a Workholding Bolt. *MATEC Web of Conferences*, 2016, vol. 80, pp. 130, 131.
15. Wang M.H., Xiang D., Xiao C., Zhou J., Jia Z. Influence of cooling condition of tools on central deformation of workpiece and tool wear in cross wedge rolling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, vol. 59, no. 5, pp. 473–482.
16. Fillipova M.V., Temlyantsev M.V., Peretyat'ko V.N., Prudskii E.E. Mathematical modeling of balls production. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya*, 2017, vol. 60, no. 7, pp. 516–521. (In Russ.).
17. Chila P., Pater Z., Tomczak J., Chila P. Numerical analysis of rolling process for producing steel balls using helical rolls. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2016, vol. 61, no. 2, pp. 485–492.
18. Pater Z. Analysis of helical rolling process of balls formed from a head of a scrapper rail. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 2016, vol. 10, no. 30, pp. 110–114.
19. Tselikov A.I., Barbarich M.V. *Spetsial'nye prokatnye stany* [Special rolling mills]. Moscow: Metallurgiya, 1971, 336 p. (In Russ.).
20. Dubinskii F.S., Sosedkova M.A. *Metody proektirovaniya temperaturnykh rezhimov goryachei sortovoi prokatki* [Designing methods of temperature regimes of hot long products rolling]. Chelyabinsk: izd-vo YuUrGU, 2007, 18 p. (In Russ.).
21. Rubtsov V.Yu., Shevchenko O.I., Mironova M.V. Perfection of dynamic rolling regime for increasing ball-rolling mill rollers endurance. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya*, 2018, vol. 61, no. 12, pp. 927–932. (In Russ.).

Received April 25, 2019