



УДК 621.771.65

DOI 10.17073/0368-0797-2024-6-637-643



Оригинальная статья

Original article

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СТАЛЕЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МЕЛЮЩИХ ШАРОВ НА ИХ ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

А. А. Уманский[✉], В. В. Байдин, А. С. Симачев

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

✉ umanskii@bk.ru

Аннотация. Авторы определили закономерности влияния химического состава и параметров деформации шаровых сталей экспериментального химического состава на их деформируемость. Разработку экспериментальных химических составов шаровых сталей вели, опираясь на имеющийся опыт отечественных и зарубежных исследователей, с учетом возможности дальнейшего применения полученных результатов для шаровых сталей стандартных марок. Исследования проводились с использованием специализированной лабораторной установки методом горячего кручения образцов. Повышение содержания углерода в диапазоне 0,72 – 0,85 %, марганца в интервале от 0,72 до 0,85 %, хрома в диапазоне 0,38 – 1,71 % и никеля в интервале от 0,08 до 0,87 % оказывает значимое влияние на увеличение сопротивления деформации сталей. При этом количественное влияние содержания углерода в сталях на их сопротивление деформации является значительно более выраженным по отношению к марганцу, хрому и никелю. Определено, что снижение температуры деформации с 1200 до 900 °С, увеличение скорости деформации в интервале от 1 до 10 с⁻¹ и истинной деформации в диапазоне 0,05 – 0,35 обуславливают повышение сопротивления деформации шаровых сталей вне зависимости от их химического состава. Влияние всех перечисленных параметров на сопротивление сталей деформированию имеет выраженный нелинейный характер и наибольшее относительное влияние на сопротивление деформации оказывает температура деформации. Полученные данные обобщены в виде уравнения множественной регрессии, устанавливающего количественную взаимосвязь сопротивления стали деформированию с ее химическим составом и параметрами деформации. Проверка адекватности полученного уравнения применительно к условиям прокатки заготовок шаровых сталей стандартных марок на непрерывном среднесортном стане 450 АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» подтвердила возможность его использования для прогнозирования энергосиловых параметров прокатки шаровых сталей различного химического состава.

Ключевые слова: сопротивление деформации, мелющие шары, сортовые заготовки, горячее кручение, химический состав, температурно-скоростные параметры деформации

Для цитирования: Уманский А.А., Байдин В.В., Симачев А.С. Исследование влияния химического состава сталей для производства мелющих шаров на их деформационные характеристики. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2024;67(6):637–643.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-6-637-643>

INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION OF STEELS FOR PRODUCTION OF GRINDING BALLS ON THEIR DEFORMATION CHARACTERISTICS

A. A. Umanskii[✉], V. V. Baidin, A. S. Simachev

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

✉ umanskii@bk.ru

Abstract. The conducted studies determined the patterns of influence of chemical composition and deformation parameters of ball steels with experimental chemical composition on their deformability. The development of experimental chemical compositions of ball steels was carried out based on the existing experience of domestic and foreign researchers, taking into account the possibility of further application of the obtained results for ball steels of standard grades. The studies were carried out using a specialized laboratory installation by the method of hot-rolling samples. An increase in the carbon content in the range of 0.72 – 0.85 %, manganese in the range from 0.72 to 0.85 %, chromium in the range of 0.38 – 1.71 % and nickel in the range from 0.08 to 0.87 % has a significant effect on increasing the deformation resistance of steels. At the same time, the quantitative effect of carbon content in the steels on their deformation resistance is much more

pronounced in relation to manganese, chromium and nickel. It was determined that a decrease in the deformation temperature from 1200 to 900 °C, an increase in the deformation rate in the range from 1 to 10 s⁻¹ and true deformation in the range 0.05 – 0.35 cause an increase in the deformation resistance of ball steels, regardless of their chemical composition. The influence of all these parameters on the deformation resistance of steels has a pronounced nonlinear character and the deformation temperature has the greatest relative influence on the deformation resistance. The data obtained are summarized in the form of a multiple regression equation, which establishes the quantitative relationship between the resistance of steel to deformation with its chemical composition and deformation parameters. Verification of the adequacy of the obtained equation in relation to the rolling conditions of ball steel billets of standard grades at the continuous medium-grade mill 450 of JSC EVRAZ United West Siberian Metallurgical Plant confirmed the possibility of using it to predict the energy-power parameters of rolling ball steels of various chemical composition.

Keywords: deformation resistance, grinding balls, long billet, hot torsion, chemical composition, temperature and velocity parameters of deformation

For citation: Umanskii A.A., Baidin V.V., Simachev A.S. Influence of chemical composition of steels for production of grinding balls on their deformation characteristics. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(6):637–643. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-6-637-643>

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день одним из основных направлений повышения твердости, износо- и ударостойкости стальных мелющих шаров является совершенствование их химического состава [1 – 3]. Данный факт объясняется тем, что стандартные шаровые стали не обеспечивают необходимого уровня приведенных показателей качества мелющих шаров [4 – 6].

Целый ряд разработок направлен на совершенствование химического состава сталей с целью повышения эксплуатационных характеристик производимых мелющих шаров. В работах [7; 8] проведено опытно-промышленное опробование производства шаров диаметром 35 мм пятой группы твердости из стали, легированной марганцем и хромом до концентрации 0,90 – 1,05 и 0,40 соответственно. Согласно полученным результатам произведенные из указанной стали шары после термической обработки обладают следующими характеристиками:

- твердость на поверхности 59 – 64 HRC;
- твердость на глубине 1/2 радиуса 55 – 60 HRC;
- коэрцитивная сила (внутренние напряжения шара) 44 – 50 единиц.

Существует значительное количество изобретений [9 – 11], в которых качественный и количественный составы легирующих элементов в предлагаемых шаровых сталях изменяется в достаточно широких пределах. При этом в изобретениях отечественных авторов в качестве основных легирующих элементов выступают марганец и хром при их содержании в сталях до 0,90 и 0,60 % соответственно. Отличительные особенности изобретений зарубежных авторов от отечественных аналогов: значительно более широкий перечень легирующих элементов в шаровых сталях, в который, помимо марганца и хрома, также входят кремний, никель, молибден, ниобий; более высокая степень легирования марганцем и хромом (верхний предел их концентрации в сталях составляет 2,0 и 1,5 %).

В настоящее время следует констатировать отсутствие единого мнения об оптимальном химическом составе стали для производства мелющих шаров. Однако имеется общая тенденция к повышению сте-

пени легирования рассматриваемых сталей. Увеличение концентрации легирующих элементов в стали в большинстве случаев повышает их сопротивление деформации в процессе прокатки [12 – 14], что приводит к соответствующему увеличению нагрузок на оборудование прокатных станов [15; 16].

С учетом значительной погрешности, возникающей при экстраполяции данных о сопротивлении деформации известных марок на стали нового химического состава [17 – 19], имеет место необходимость в проведении экспериментальных исследований рассматриваемых показателей применительно к шаровым сталям новых марок. Помимо станов поперечно-винтовой прокатки в технологическом цикле производства мелющих шаров задействованы многоклетевые крупно- или среднесортные прокатные станы, используемые для производства исходных заготовок круглого поперечного сечения.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объекта исследований использовали образцы пяти вариантов химического состава, для которых ранее [20] проведены исследования процессов формирования микроструктуры шаров после их термической обработки. Основными отличительными особенностями указанных вариантов было следующее (табл. 1):

- 1) наличие и степень легирования хромом и никелем;
- 2) содержание углерода и марганца в стали.

При разработке указанных химических составов шаровых сталей учитывали опыт отечественных и зарубежных исследователей. При этом диапазон концентрации углерода, марганца, хрома и никеля в опытных сталях выбирали с учетом возможности дальнейшего обобщения результатов исследований в виде зависимостей механических и деформационных характеристик от содержания указанных элементов и возможности их применения для шаровых сталей стандартных марок (табл. 2).

Исследования сопротивления деформации шаровых сталей проводили на специализированной лабораторной установке (рис. 1) методом горячего кручения.

Таблица 1. Химический состав образцов опытных сталей

Table 1. Chemical composition of experimental steel samples

Элемент	Содержание, мас. %, элементов в стали (вариант)				
	1	2	3	4	5
C	0,73 – 0,75	0,70 – 0,74	0,83 – 0,85	0,72 – 0,76	0,75 – 0,78
Si	0,31 – 0,38	0,32 – 0,36	0,34 – 0,37	0,36 – 0,39	0,30 – 0,32
Mn	0,75 – 0,84	0,75 – 0,78	0,80 – 0,85	0,76 – 0,78	0,72 – 0,75
Cr	0,38 – 0,42	1,43 – 1,49	0,81 – 0,83	1,63 – 1,71	1,06 – 1,10
Ni	0,08 – 0,11	0,73 – 0,75	0,19 – 0,21	0,85 – 0,87	0,46 – 0,48
Cu	0,09 – 0,12	0,10 – 0,12	0,11 – 0,13	0,09 – 0,11	0,11 – 0,13
Ti	0,004 – 0,006	0,004 – 0,005	0,007	0,014 – 0,016	0,007
V	0,03 – 0,04	0,04	0,07 – 0,08	0,04	0,04
S	0,010 – 0,014	0,010 – 0,013	0,015 – 0,018	0,009 – 0,011	0,009 – 0,010
P	0,009 – 0,012	0,009 – 0,013	0,009 – 0,012	0,005 – 0,008	0,008 – 0,010

Конструкция включает в себя подвижный и неподвижный валы, расположенные внутри печи сопротивления. Образцы в форме цилиндров с дополнительными головками на концевых участках фиксируются в пазах указанных валов и после нагрева до заданной температуры испытываются на кручение путем вращения подвижного вала.

Наличие в блоке программного управления установки информации о крутящем моменте и накоплении степени деформации позволяет определить сопротивление деформации:

$$\sigma = \frac{12\sqrt{3}}{\pi d_0^3} M, \quad (1)$$

где d_0 – диаметр образца до испытания; M – крутящий момент.

Адекватность использования указанной установки для определения пластических и деформационных

характеристик сталей подтверждена ранее проведенными исследованиями рельсовых сталей [21].

При проведении экспериментальных исследований температуру деформации варьировали в пределах 900 – 1200 °С с шагом 50 °С, относительную степень деформации – в пределах 5 – 35 % с шагом 5 %; использовали скорость деформации 1, 5 и 10 с⁻¹. Выбранный интервал варьирования параметров деформации соответствует диапазону их изменения при производстве сортовых заготовок и мелющих шаров в условиях промышленных прокатных станов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Обобщение результатов экспериментальных исследований позволило установить (рис. 2, табл. 1), что вне зависимости от сочетания температурно-скоростных параметров и степени деформации наиболее трудно-деформируемой из рассматриваемых является сталь 4,

Таблица 2. Химический состав шаровых сталей стандартных марок

Table 2. Chemical composition of standard grade ball steels

Марка стали	Содержание элементов, мас. %								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	Cu	S	P
Ш2.1	0,60 – 0,69	0,20 – 0,30	0,60 – 0,70	–	–	–	–	≤ 0,025	≤ 0,030
Ш2.2	0,70 – 0,80	0,20 – 0,30	0,60 – 0,70	–	–	–	–	≤ 0,015	≤ 0,020
Ш2.3	0,65 – 0,75	0,20 – 0,35	0,70 – 0,80	0,30 – 0,40	≤ 0,30	–	≤ 0,30	≤ 0,020	≤ 0,030
Ш2.4	0,65 – 0,75	0,20 – 0,35	0,70 – 0,80	0,35 – 0,45	≤ 0,30	–	≤ 0,30	≤ 0,020	≤ 0,030
Ш2.Л	0,65 – 0,75	0,20 – 0,35	0,70 – 0,80	0,50 – 0,60	≤ 0,30	–	≤ 0,30	≤ 0,015	≤ 0,020
Ш1	0,50 – 0,65	0,17 – 0,37	0,60 – 0,70	≤ 0,30	≤ 0,25	≤ 0,03	≤ 0,25	≤ 0,020	≤ 0,030
Ш2	0,60 – 0,75	0,17 – 0,37	0,65 – 0,80	≤ 0,30	≤ 0,25	≤ 0,03	≤ 0,25	≤ 0,020	≤ 0,030
Ш4.1	0,60 – 0,70	0,35 – 0,45	0,65 – 0,75	0,35 – 0,45	≤ 0,25	≤ 0,03	≤ 0,25	≤ 0,020	≤ 0,030
Ш4.2	0,55 – 0,65	0,35 – 0,45	0,65 – 0,75	0,50 – 0,60	0,30 – 0,40	0,02 – 0,05	≤ 0,25	≤ 0,020	≤ 0,030
Ш5	0,65 – 0,75	0,35 – 0,45	0,75 – 0,85	0,55 – 0,60	0,40 – 0,50	0,02 – 0,05	≤ 0,25	≤ 0,020	≤ 0,030

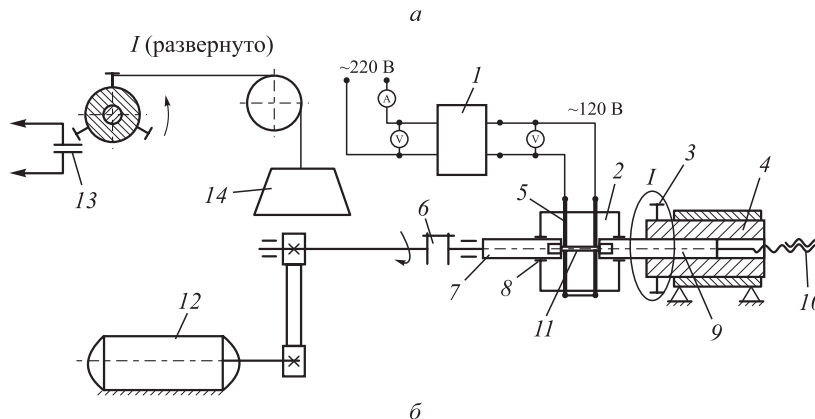


Рис. 1. Общий вид (а) и схема (б) установки для испытаний образцов на горячее кручение:

1 – трансформатор; 2 – печь сопротивления; 3 – стопорный винт; 4 – корпус неподвижного вала; 5 – устройство для фиксации количества оборотов; 6 – силитовые нагреватели; 7 – подвижный вал; 8 – уплотнение; 9 – неподвижный вал; 10 – винт-гайка; 11 – стальной образец; 12 – электродвигатель; 13 – размыкающий контакт; 14 – груз

Fig. 1. General view (a) and diagram (b) of the installation for testing samples for hot torsion:

1 – transformer; 2 – resistance furnace; 3 – locking screw; 4 – fixed shaft housing; 5 – device for fixing the number of revolutions; 6 – silite heaters; 7 – movable shaft; 8 – seal; 9 – fixed shaft; 10 – screw nut; 11 – steel sample; 12 – electric motor; 13 – opening contact; 14 – load

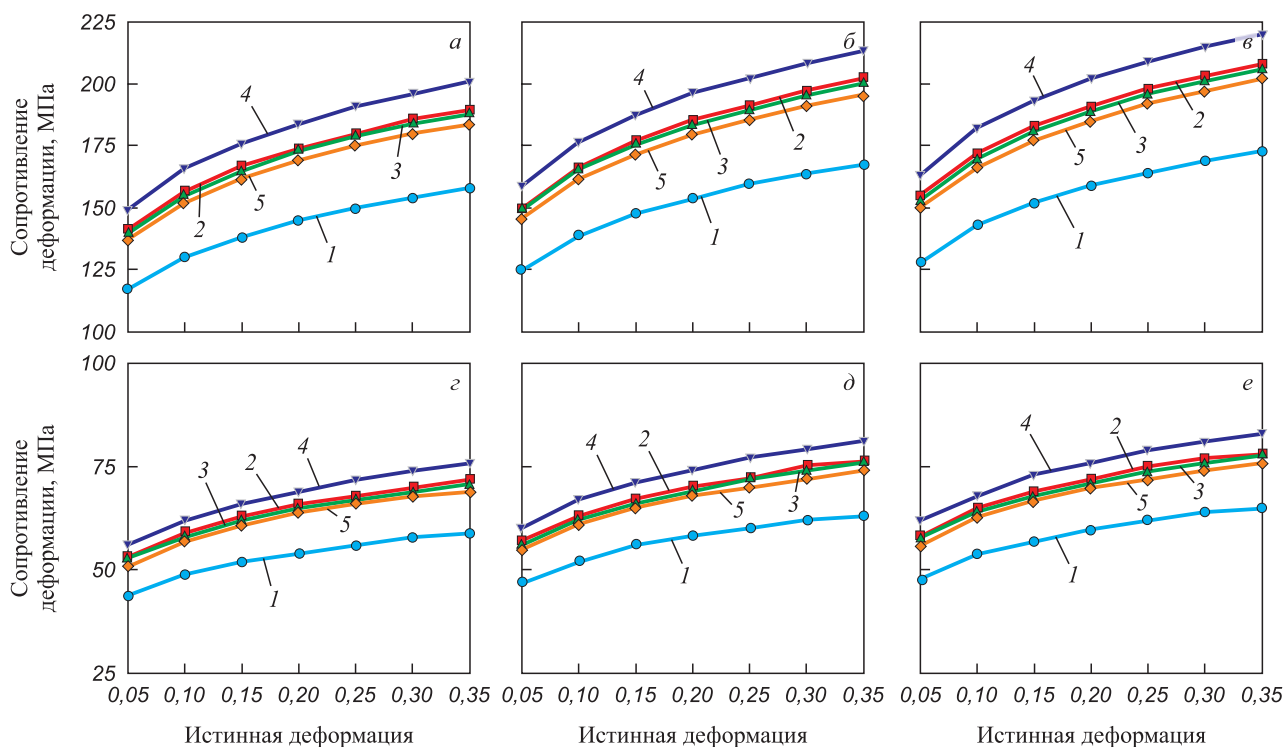


Рис. 2. Кривые течения для шаровых сталей при температуре деформации 900 (а – в) и 1200 °С (z – e) и скорости деформации 1 (а, z), 5 (б, д) и 10 с⁻¹ (в, e)

Fig. 2. Flow curves for ball steels at deformation temperatures of 900 (a – в) and 1200 °C (z – e) and deformation rates of 1 (a, z), 5 (б, д) and 10 s⁻¹ (в, e)

а значительно меньшим сопротивлением деформации обладает сталь 1. При этом сопротивления деформированию сталей химического состава по оставшимся вариантам 2, 3, 5 находятся примерно на одном уровне и занимают промежуточное положение.

Полученные результаты можно интерпретировать следующим образом. Для сталей 1, 2, 4 и 5 наиболее значимое влияние на сопротивление деформации оказало содержание в них хрома и никеля. Фактически сопротивление деформации данных сталей пропорционально концентрации в них указанных элементов. При этом данная зависимость проявляется особенно явно с учетом незначительного отклонения концентраций остальных элементов. Отклонение по среднему содержанию углерода в образцах не превышает 0,045 %, кремния – 0,065 %, марганца – 0,060 % (табл. 1). Применительно к стали 3 влияние хрома и никеля на ее деформируемость не является определяющим, так как при значительно более низкой концентрации рассматриваемых элементов в сталях 2 и 5 (табл. 1) сопротивление деформации имеет близкое с указанными сталями значение. Такие значения сопротивления деформации стали 3, очевидно, явились следствием повышенного содержания в ней углерода на 0,120 и 0,075 % и марганца на 0,06 и 0,09 % по сравнению со сталями 2 и 5. В целом полученные результаты свидетельствуют о преобладающем в количественном отношении влиянии содержания углерода в шаровых сталях на их сопротивление деформации по отношению к другим рассматриваемым элементам.

Определено, что для всех рассматриваемых вариантов химического состава сталей увеличение степени и скорости деформации, а также уменьшение температуры деформации приводит к снижению их деформируемости (повышению сопротивления деформации). При этом влияние всех перечисленных параметров на сопротивление деформации имеет выраженный нелинейный характер, что качественно согласуется с общепринятыми представлениями. Наибольшее влияние на сопротивление деформации в рамках рассматриваемых интервалов изменения параметров деформации оказывают ее температурные условия. Так, снижение температуры деформации с максимального до минимального значений (с 1200 до 900 °С) приводит к увеличению сопротивления деформации в среднем в 2,7 раза при аналогичных скорости и степени деформации. В то же время повышение истинной деформации с нижней до верхней границ рассматриваемого интервала (с 0,05 до 0,35) увеличивает сопротивление деформированию при аналогичных температурно-скоростных параметрах только в среднем на 36 %, а влияние скорости деформации проявляется в возможном увеличении сопротивления деформации только на 9 %.

Обобщение и обработка полученных результатов экспериментальных исследований позволили получить уравнение регрессии, устанавливающее количествен-

ную взаимосвязь сопротивления деформации сталей для производства мелющих шаров с их химическим составом и параметрами прокатки:

$$\sigma_s = (4032[C] + 336[Mn] + 546[Cr] + 364[Ni])3689e^{-3,255\left(\frac{t}{1000}\right)}\varepsilon^{0,153}u^{0,004}, \quad (2)$$

где σ_s – сопротивление деформации стали, МПа; $[C]$, $[Mn]$, $[Cr]$ и $[Ni]$ – содержание углерода, марганца, хрома и никеля в стали, %; t – температура прокатки, °С; ε – истинная деформация; u – скорость деформации, с⁻¹.

Проверку адекватности уравнения проводили путем сравнения усилия прокатки, полученного расчетным путем с использованием вычисленных сопротивлений деформации, с фактическими усилиями прокатки при производстве шаровых заготовок диаметром 60 мм из

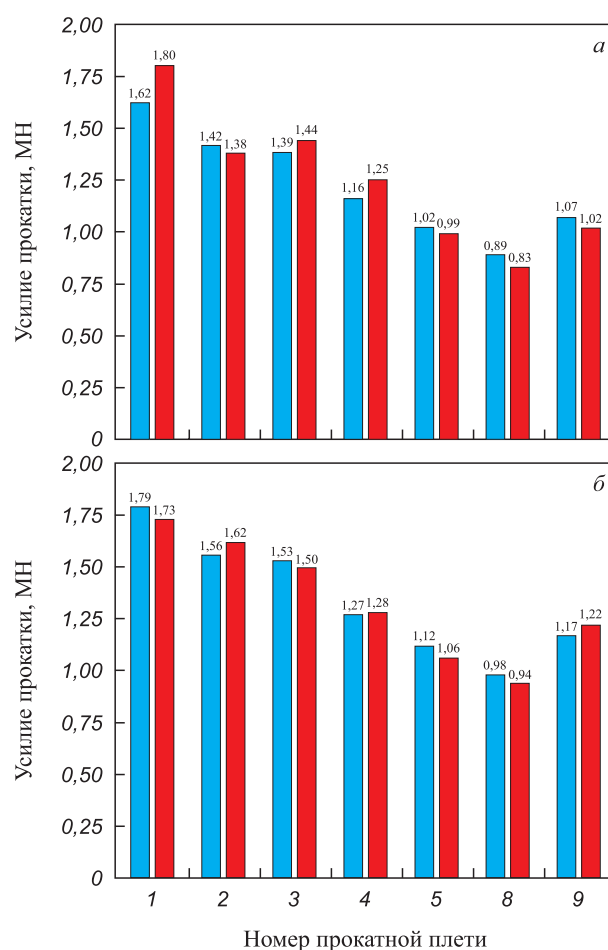


Рис. 3. Усилие прокатки в черновых клетях среднесортного стана 450 АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» при производстве шаровой заготовки диаметром 60 мм из стали марок Ш2.1 (а) и Ш2.3 (б):

■ – расчет; ■ – факт

Fig. 3. Rolling force in the roughing stands of the medium-grade mill 450 of JSC EVRAZ United West Siberian Metallurgical Plant in the production of a ball furnace with a diameter of 60 mm made of steel grades Sh2.1 (a) and Sh2.3 (b):

■ – calculation; ■ – fact

сталей марок Ш2.1 и Ш2.3 (табл. 2) на непрерывном среднесортном стане 450 АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат». По полученным данным, отклонения не превысили 10 % (рис. 3). Это свидетельствует об адекватности уравнения и возможности его использования при разработке и совершенствовании режимов прокатки как мелющих шаров, так и исходных заготовок.

Выводы

На основании экспериментальных исследований определены закономерности качественного и количественного влияния химического состава шаровых сталей и параметров их деформации на сопротивление пластическому деформированию. Полученные результаты обобщены в виде уравнения множественной регрессии, адекватность которого подтверждена применительно к условиям производства заготовок из шаровых сталей на непрерывном среднесортном стане 450 АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Aldrich C. Consumption of steel grinding media in mills. *Minerals Engineering*. 2013;49:77–91. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.04.023>
2. 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. <https://doi.org/10.13251/j.issn.0254-6051.2017.05.040>
3. Kotenok V.I., Podobedov S.I. Energy-efficient design of rolls for ball-rolling mills. *Metallurgist*. 2001;45(9–10):363–367. <https://doi.org/10.1023/A:1017920006038>
4. Song Z., Pu Y., Liu Z., Wang B. Analysis of failure of grinding balls during service. *Metal Science and Heat Treatment*. 2022;64(12):127–133. <https://doi.org/10.1007/s11041-022-00772-3>
5. Li T., Peng Y., Zhu Z., Zou S., Liu S., Yin Z., Ni X., Chang X. Multi-layer kinematics and collision energy in a large-scale grinding mill-the largest semi-autogenous grinding mill in China. *Advances in Mechanical Engineering*. 2016;8(12):1–10. <https://doi.org/10.1177/1687814016681371>
6. Рахутин М.Г., Бойко П.Ф. Пути совершенствования методов оценки основных характеристик мелющих шаров. *Уголь*. 2017;(12(1101)):49–52. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2017-12-49-52>
Rakhutin M.G., Boyko P.F. Ways to improve assessment methods of the main characteristics of grinding balls. *Ugol' – Russian Coal Journal*. 2017;(12(1101)):49–52. (In Russ.). <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2017-12-49-52>
7. 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.
Bykov P.O., Kasimgazinov A.D. Research and approbation of production technology for rolled grinding balls of the 5th group of hardness in the PB LLP “Casting”. *Nauka i tekhnika Kazakhstana*. 2018;(1):31–40. (In Russ.).
8. Найзабеков А.Б., Мухаметкалиев Б.С., Арбуз А.С., Лежнев С.Н. Снижение расхода стальных мелющих шаров путем улучшения технологии их производства. *Вести высших учебных заведений Черноземья*. 2016;(4(46)):78–86.
Naizabekov A.B., Mukhametkaliev B.S., Arbuz A.S., Lezhnev S.N. Reducing consumption of steel grinding balls by improving their production technology. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedenii Chernozem'ya*. 2016;(4(46)):78–86. (In Russ.).
9. Пат. 2340699 РФ. Сталь для мелющих шаров / В.В. Павлов, О.В. Корнева, О.П. Аtkонова; заявл. 31.10.2006; опубл. 10.12.2008. Бюл. 34.
10. Пат. 2425168 РФ. Сталь / А.Б. Юрьев, Н.Х. Мухатдинов, О.П. Аtkонова и др.; заявл. 05.10.2009; опубл. 27.07.2011. Бюл. № 21.
11. Пат. 2425169 РФ. Сталь / А.Б. Юрьев, Н.Х. Мухатдинов, Н.А. Козырев и др.; заявл. 05.10.2009; опубл. 27.07.2011. Бюл. № 21.
12. Rodriguez-Ibabe J.M., Gutiérrez I., López B., Iza-Mendia A. Modeling of the resistance to hot deformation and the effects of microalloying in high-Al steels under industrial conditions. *Materials Science Forum*. 2005;500-501:195–202. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.500-501.195>
13. Konovalov A.V., Smirnov A.S., Parshin V.S., Dronov A.I., Karamyshev A.P., Nekrasov I.I., Fedulov A.A., Serebryakov A.V. Study of the resistance of steels 18KhMFB and 18Kh3MFB to hot deformation. *Metallurgist*. 2016;59(11–12):1118–1121. <https://doi.org/10.1007/s11015-016-0279-6>
14. Safronov A.A., Belskiy S.M., Chernyj V.A., Mazur I.P. Modeling of temperature influence on resistance to plastic deformation of electrotechnical steels in hot rolling. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018;1134:012050.
15. Уманский А.А., Дорофеев В.В., Думова Л.В. Разработка теоретических основ энергоэффективного производства железнодорожных рельсов с повышенными эксплуатационными свойствами. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2020;63(5):318–326. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-5-318-326>
Umanskii A.A., Dorofeev V.V., Dumova L.V. Theoretical foundations for energy-efficient production of railway rails with improved performance properties. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020;63(5):318–326. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-5-318-326>
16. Остапенко А.Л., Переходченко В.А., Кушнир О.Н., Пластун Д.А. О применимости методик расчета сопротивления деформации для оценки энергосиловых условий горячей прокатки полос. *Сталь*. 2014;(5):41–52.
Ostapenko A.L., Perehodchenko V.A., Kushnir O.N., Plastun D.A. On the applicability of deformation resistance calculation methods for evaluating energy conditions of hot strip rolling. *Stal'*. 2014;(5):41–52. (In Russ.).
17. Gladkovsky S.V., Potapov A.I., Lepikhin S.V. Studying the deformation resistance of Ep679 maraging steel. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. 2015;(4):18–28. <https://doi.org/10.17804/2410-9908.2015.4.018-028>
18. Уманский А.А., Головатенко А.В., Темлянецев М.В., Дорофеев В.В. Экспериментальные исследования

пластичности и сопротивления деформации хромистых рельсовых сталей. *Черные металлы*. 2019; (6):24–28.

Umanskii A.A., Golovatenko A.V., Temlyantsev M.V., Dorofeev V.V. Experimental studies of plasticity and deformation resistance of chromium rail steels. *Chernye metally*. 2019;(6):24–28. (In Russ.).

19. Адигамов Р.Р., Никишин И.А., Жителей П.С., Андреев А.Р., Карлина А.И. Опыт освоения производства стальных мелющих шаров в ПАО «СЕВЕРСТАЛЬ». *Сталь*. 2022;(3):13–18.

Adigamov R.R., Nikishin I.A., Zhitelev P.S., Andreev A.R., Karlina A.I. Experience of implementing steel crushing balls manufacture in the PJSC “SEVERSTAL”. *Stal’*. 2022;(3):13–18. (In Russ.).

20. Уманский А.А., Байдин В.В., Симачев А.С., Думова Л.В. Особенности формирования микроструктуры мелющих тел, произведенных из рельсовых сталей различного химического состава. В кн.: *Металлургия: технологии, инновации, качество. Труды XXIII Международной научно-практической конференции*. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ; 2022:21–28.

Сведения об авторах

Information about the Authors

Александр Александрович Уманский, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0003-4403-9006

E-mail: umanskii@bk.ru

Вадим Викторович Байдин, соискатель степени к.т.н. кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: 5745426@gmail.com

Артём Сергеевич Симачев, к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением и металловедение. ЕВРАЗ ЗСМК», Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0002-9712-3757

E-mail: simachev_as@mail.ru

Aleksandr A. Umanskii, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy and Chemical Technology, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0003-4403-9006

E-mail: umanskii@bk.ru

Vadim V. Baidin, Candidates for a degree of Cand. Sci. (Eng.) of the Chair of Ferrous Metallurgy and Chemical Technology, Siberian State Industrial University

E-mail: 5745426@gmail.com

Artem S. Simachev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Metal Forming and Metal Science. OJSC “EVRAZ ZSMK”, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-9712-3757

E-mail: simachev_as@mail.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

А. А. Уманский – разработка плана исследований, обобщение и интерпретация результатов, редактирование статьи.

В. В. Байдин – проведение экспериментов и обработка их результатов.

А. С. Симачев – анализ литературных источников, написание основного текста статьи.

A. A. Umanskii – development of a research plan, generalization and interpretation of the results, editing the article.

V. V. Baidin – conducting experiments and processing their results.

A. S. Simachev – analysis of literary sources, writing the main text of the article.

Поступила в редакцию 15.04.2024

После доработки 21.08.2024

Принята к публикации 17.10.2024

Received 15.04.2024

Revised 21.08.2024

Accepted 17.10.2024