



УДК 621.771.65

DOI 10.17073/0368-0797-2023-6-645-652

Оригинальная статья
Original article

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ МЕЛЮЩИХ ШАРОВ ИЗ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ ЗАКАЛОЧНОЙ СРЕДЫ

А. А. Уманский , В. В. Байдин, А. С. Симачев,
Л. В. Думова, С. О. Сафонов

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

 umanskii@bk.ru

Аннотация. Проведены исследования формирования микроструктуры мелющих шаров из отбраковки рельсовой стали при их закалке в различных полимерных средах. На первом этапе, на основании исследований охлаждающей способности растворов полимеров «ПКМ» и «Термовит» при варьировании их концентраций и температуры построены кривые охлаждения мелющих шаров из рельсовой стали марки К76Ф. При концентрации указанных полимеров в водном растворе 2 и 4 % скорость охлаждения мелющих шаров из стали К76Ф практически идентична при температурах раствора 20 и 30 °С и значительно снижается в случае увеличения температуры раствора полимера до 40 °С. При этом наиболее заметное снижение скорости охлаждения характерно для полимера «ПКМ» при его концентрации на уровне 2 %. На втором этапе проведены металлографические исследования микроструктуры мелющих шаров из рельсовой стали К76Ф, закалка которых проводилась в лабораторных условиях с использованием полимеров «ПКМ» и «Термовит» с концентраций 2–4 % и температурой 20–40 °С. Использование раствора «ПКМ» для закалки шаров обеспечивает значительно более высокое качество микроструктуры и твердость термообработанных шаров по сравнению с применением полимера «Термовит». Варьирование концентрации и температуры полимерной закалочной среды «ПКМ» позволяет получать мелющие шары с различными эксплуатационными характеристиками, определяющими потенциальные области их применения. Закалка шаров в растворе указанного полимера с концентрацией 2 % и температурой 20–30 °С обеспечивает получение шаров с высокой твердостью (соответствующей IV группе твердости по ГОСТ 7524 – 2015), а использование для закалки раствора этого же полимера с концентрацией 4 % и температурой 20–30 °С создает возможность производства шаров с более низкой твердостью, но потенциально высокой ударной стойкостью.

Ключевые слова: микроструктура, мелющие шары, рельсовая сталь, полимеры, термообработка, закалочная среда, ударная стойкость

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20170, гранта Кемеровской области – Кузбасса.

Для цитирования: Уманский А.А., Байдин В.В., Симачев А.С., Думова Л.В., Сафонов С.О. Исследования процессов формирования микроструктуры мелющих шаров из рельсовой стали в зависимости от параметров закалочной среды. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2023;66(6):645–652. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-6-645-652>

FORMATION OF MICROSTRUCTURE IN RAIL STEEL GRINDING BALLS DEPENDING ON QUENCHING MEDIUM PARAMETERS

A. A. Umanskii , V. V. Baidin, A. S. Simachev,
L. V. Dumova, S. O. Safonov

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

 umanskii@bk.ru

Abstract. Studies of the formation of microstructure of grinding balls from the rejects of rail steel were carried out during their quenching in various polymer media. At the first stage, based on studies of the cooling capacity of solutions of polymers PCM and Thermovit with varying concentrations and temperatures, the authors constructed the cooling curves of grinding balls made of K76F rail steel. It was found that at concentration of these polymers in an aqueous solution of 2 and 4 %, cooling rate of grinding balls made of K76F steel is almost identical at solution temperatures of 20 and 30 °C and significantly decreases when the temperature of the polymer solution increases to 40 °C. At the same time, the most noticeable decrease in the cooling rate is characteristic of PCM polymer with its concentration at the level of 2 %. At the second stage, the authors carried out metallographic studies of the microstructure of grinding balls made of K76F rail steel, which were quenched in laboratory conditions using polymers

PCM and Thermovit with concentrations of 2–4 % and temperature of 20–40 °C. As a result, it was determined that the use of the PCM solution for quenching balls provides a significantly higher quality of microstructure and hardness of heat-treated balls compared to the use of the Thermovit polymer. At the same time, varying the concentration and temperature of the PCM polymer quenching medium allows one to obtain grinding balls with different performance characteristics that determine the potential areas of their application. Thus, quenching of balls in a solution of the specified polymer with concentration of 2 % and temperature of 20–30 °C ensures the production of balls with high hardness (corresponding to the IV hardness group according to the state standard GOST 7524–2015), and the use of a solution of the same polymer with concentration of 4 % and temperature of 20–30 °C for quenching creates the possibility of producing balls with lower hardness, but potentially high impact resistance.

Keywords: microstructure, grinding balls, rail steel, polymers, heat treatment, quenching medium, impact resistance

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 22-29-20170, and by the Kemerovo Region – Kuzbass.

For citation: Uman'skii A.A., Baidin V.V., Simachev A.S., Dumova L.V., Safonov S.O. Formation of microstructure in rail steel grinding balls depending on quenching medium parameters. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(6):645–652.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-6-645-652>

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы наблюдается тенденция к интенсивному развитию отечественных шаропрокатных производств. Запущен в эксплуатацию ряд современных шаропрокатных станков [1; 2], на ряде действующих станков проводится значительный объем работ по совершенствованию технологических режимов производства помольных шаров [3–6]. Этот факт объясняется повышением спроса на мелющие шары с высокими эксплуатационными характеристиками, а именно, твердостью, износостойкостью и устойчивостью к ударным нагрузкам. Это, в свою очередь, обусловлено тем, что повышение срока эксплуатации мелющих шаров, которые используются для измельчения исходного сырья в металлургической, горно-рудной, цементной отраслях промышленности, значительно снижает себестоимость готовой продукции и повышает ее качество [7–9]. При этом снижение себестоимости происходит за счет уменьшения удельного расхода шаров, а повышение качества – за счет минимизации попадания частиц расколовшихся шаров в измельчаемые материалы [10].

Анализ материалов отечественных и зарубежных исследователей показал, что повышение твердости и ударной стойкости шаров достигается, в основном, за счет оптимизации химического состава сталей, применяемых для производства шаров [11–13], и за счет совершенствования режимов их термообработки [14–16]. При этом на ударную стойкость мелющих шаров, помимо указанных характеристик, значительное влияние также оказывает качество их микроструктуры [17; 18].

Стали, из которых производятся мелющие шары, по химическому составу можно подразделить на две основные группы [19; 20]:

- специализированные шаровые марки стали;
- стали, изначально предназначенные для производства других видов проката (углеродистые или легированные).

При этом во второй группе сталей значительную долю составляет отбраковка заготовок рельсовых сталей [21–23].

Технологии термической обработки мелющих шаров можно разделить на три основных варианта ее организации:

- 1) закалка с последующим самоотпуском шаров на воздухе;
- 2) закалка с последующим низким отпуском;
- 3) «прерванная закалка» (закалка в несколько стадий) + низкий отпуск.

Более предпочтительными являются второй и третий варианты термообработки шаров, поскольку они обеспечивают снятие закалочных напряжений [24; 25]. При этом третий вариант более сложен в реализации.

Вне зависимости от принятого варианта термической обработки мелющих шаров формирование их качественной закалочной микроструктуры в значительной степени определяется охлаждающей способностью применяемой закалочной среды. Наиболее перспективным видом закалочной среды являются полимеры, так как в случае их применения реализуется возможность регулирования их охлаждающей способности в широких пределах за счет разбавления водой до различных концентраций.

Обобщая вышесказанное, можно констатировать, что исследования процессов формирования закалочной микроструктуры мелющих шаров из рельсовой стали при использовании полимерных закалочных сред в настоящее время представляют значительный научно-практический интерес.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследований явились не подвергавшиеся термической обработке мелющие шары (отобранные в линии стана после прокатки, но до закалки) текущего производства ОАО «Гурьевский металлургический завод» из отбраковки рельсовой стали марки К76Ф.

Исследования проводили в два этапа:

1 – исследования охлаждающей способности полимерных закалочных сред «ПКМ» и «Термовит» на установке «Компатон» при варьировании концентрации и температуры указанных полимеров;

2 – исследования микроструктуры мелющих шаров после закалки с использованием полимерных закалоч-

ных сред «ПКМ» и «Термовит» при варьировании их концентрации и температуры.

Интервал изменения температуры охлаждающей среды составлял 20 – 40 °С с шагом 10 °С, концентрация каждого из исследуемых полимеров составляла 2 и 4 %.

Использованная в ходе исследований установка «Компактон» представляет собой цифровой термометр с датчиком температуры. Запись измеренных с заданным временным интервалом значений температуры проводилась в автоматическом режиме, а обработка полученных данных в программе «ТС Soft» позволяет построить кривые охлаждения.

Для определения охлаждающей способности полимерных закалочных сред проводили нагрев мелющих шаров в лабораторной печи до температуры закалки и их охлаждение в баке с закалочной средой. При этом температура закалки на 30 °С выше точки A_{c3} с учетом фактического химического состава образцов, предварительно определенного рентгеноспектральным анализом (спектрометр «Shimadzu XRF-1800»). Фактическая температура нагрева образцов под закалку находилась в интервале 790 – 802 °С, а температура низкого отпуска составляла 195 – 215 °С.

Исследования микроструктуры и твердости шаров проводили на образцах, подвергнутых термообработке: одну из долей каждого шара подвергали закалке, а вторую – закалке с последующим низким отпуском. Для анализа микроструктуры применяли оптический металлографический микроскоп «OLYMPUS GX-51», для определения твердости – твердомер ТК-2М.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ полученных кривых охлаждения мелющих шаров из рельсовой стали К76Ф свидетельствует, что для рассматриваемых полимерных закалочных сред «ПКМ» и «Термовит» вне зависимости от их концентраций (2 или 4 %) скорость охлаждения при температуре раствора 20 и 30 °С практически идентична и значительно снижается в случае увеличения температуры раствора полимера до 40 °С (рис. 1, 2). При этом наиболее выраженное снижение скорости охлаждения характерно для полимера «ПКМ» при его концентрации на уровне 2 %.

Исследованиями микроструктуры мелющих шаров после полного цикла термообработки (закалка + низкий

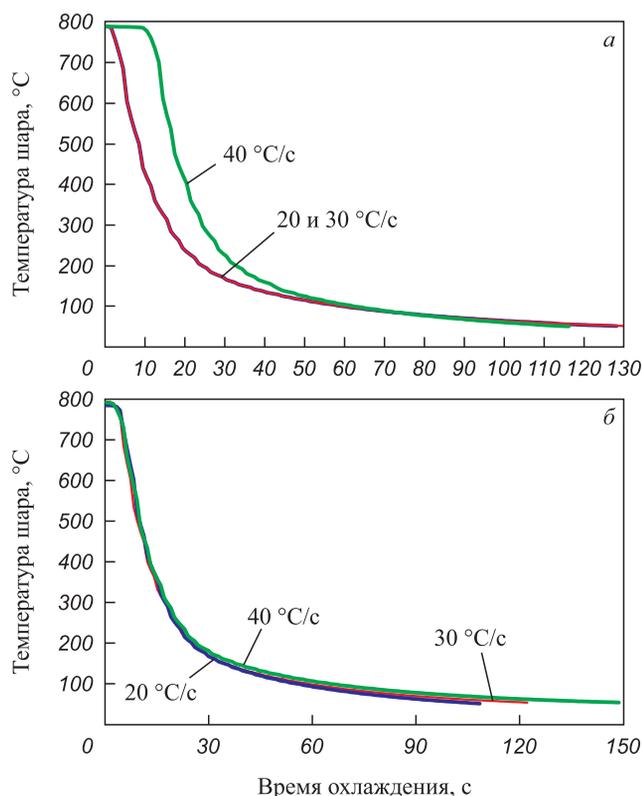


Рис. 1. Кривые охлаждения рельсовой стали К76Ф при закалке в водном растворе полимеров «ПКМ» (а) и «Термовит» (б) с концентрацией 2 % в зависимости от температуры закалочной среды

Fig. 1. Cooling curves of K76F rail steel during quenching in an aqueous solution of polymers PCM (a) and Thermovit (b) with concentration of 2 % depending on the quenching medium temperature

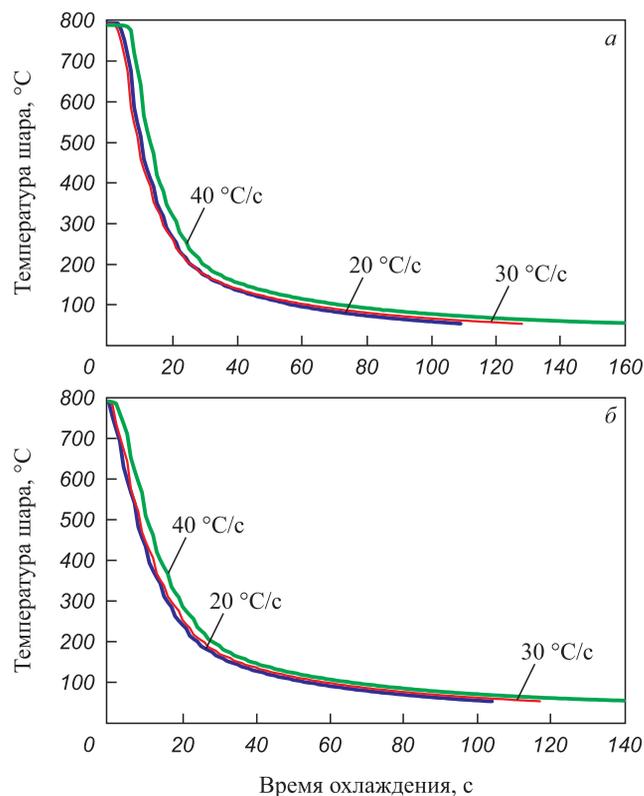


Рис. 2. Кривые охлаждения рельсовой стали К76Ф при закалке в водном растворе полимеров «ПКМ» (а) и «Термовит» (б) с концентрацией 4 % в зависимости от температуры закалочной среды

Fig. 2. Cooling curves of K76F rail steel during quenching in an aqueous solution of polymers PCM (a) and Thermovit (b) with concentration of 4 % depending on the quenching medium temperature

отпуск) показано, что наиболее оптимальная микроструктура, представляющая собой мартенсит + карбиды с некоторым количеством остаточного аустенита, формируется при следующих параметрах закалочной среды:

1) при концентрации «ПКМ» на уровне 2 % и температуре раствора 20 и 30 °С (рис. 3, а, б);

2) при концентрации «ПКМ» 4 % и температуре полимера 40 °С (рис. 3, в);

3) при концентрации полимера «Термовит» 4 % и температуре 20 °С (рис. 3, г).

При этом наибольшей твердостью, соответствующей IV группе твердости по ГОСТ 7524 – 2015 (см. таблицу), обладают шары, закаленные с применением первого из вышеуказанных вариантов сочетаний параметров закалочной среды (концентрация «ПКМ» 2 %, температура раствора 20 и 30 °С). Мелющие шары,

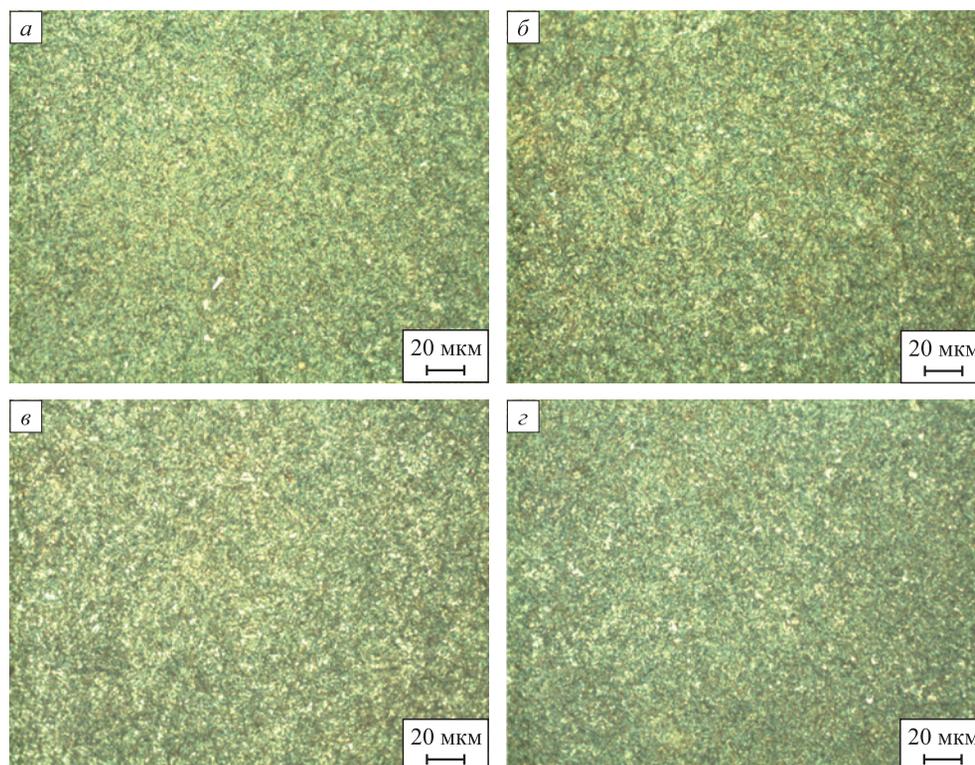


Рис. 3. Микроструктура мелющих шаров из рельсовой стали К76Ф после закалки с последующим низким отпуском: а, б – концентрация полимера «ПКМ» 2 %, температура 20 и 30 °С; в – концентрация полимера «ПКМ» 4 %, температура 40 °С; г – концентрация полимера «Термовит» 2 %, температура 20 °С

Fig. 3. Microstructure of grinding balls made of K76F rail steel after quenching with subsequent low tempering: а, б – PCM polymer concentration of 2 % at 20 and 30 °С; в – PCM polymer concentration of 4 % at 40 °С; г – Thermovit polymer concentration of 2 % at 20 °С

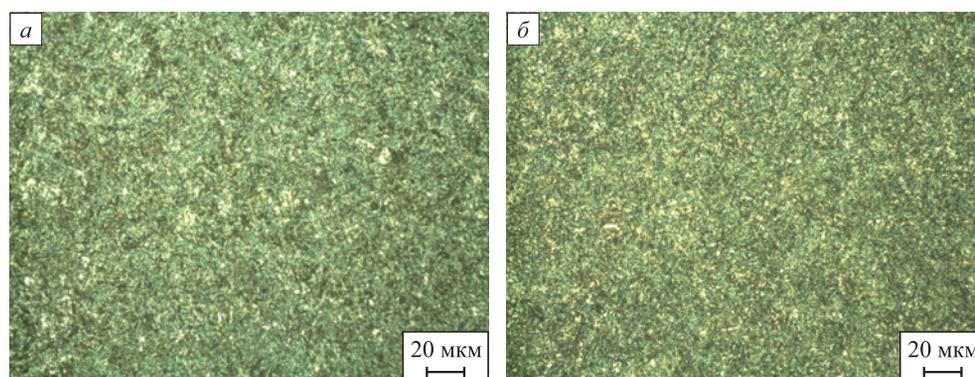


Рис. 4. Микроструктура мелющих шаров из рельсовой стали К76Ф после закалки в растворе полимера «ПКМ» с концентрацией 4 %, температура 20 °С (а) и 30 °С (б)

Fig. 4. Microstructure of grinding balls made of K76F rail steel after quenching in a solution of PCM polymer with concentration of 4 % at 20 (а) and 30 °С (б)

Сравнительный анализ твердости шаров после термообработки при использовании различных закалочных сред

Comparative analysis of hardness of the balls after heat treatment using various quenching media

Температура закалочной среды, °С	Твердость шаров после термообработки при использовании различных закалочных сред и их концентраций, HRC			
	«ПКМ»		«Термовит»	
	2 %	4 %	2 %	4 %
Поверхностная				
20	54 – 56	48 – 51	48 – 50	43 – 45
30	53 – 55	47 – 49	44 – 46	38 – 45
40	50 – 52	48 – 50	44 – 45	46 – 48
Требования ГОСТ 7524 – 2015 для шаров диаметром 60 мм по группам				
I группа	не менее 43 HRC			
II группа	не менее 48 HRC			
III, IV группы	не менее 53 HRC			
На глубине 1/2 радиуса шара				
20	52 – 54	48 – 51	48 – 50	39 – 41
30	51 – 53	47 – 49	44 – 46	38 – 45
40	50 – 51	48 – 50	44 – 45	38 – 42
Требования ГОСТ 7524 – 2015 для шаров диаметром 60 мм по группам				
I, II, III группы	–			
IV группа	не менее 43 HRC			

закаленные при сочетании параметров закалочной среды по второму и третьему варианту, соответствуют только II группе твердости по ГОСТ 7524 – 2015 (концентрация «ПКМ» 4 %, температура 40 °С; концентрация «Термовит» 4 %, температура 20 °С).

При использовании для закалки шаров раствора с 4 % полимера «ПКМ» с температурой 20 и 30 °С формируется микроструктура в виде троостомартенсита + карбида + аустенит остаточный (рис. 4). Твердость таких шаров находится на уровне II группы твердости по ГОСТ 7524 – 2015 (см. таблицу), однако они обладают потенциально повышенной ударной вязкостью. Это обусловлено свойствами троостомартенситной фазы.

При закалке шаров по остальным вариантам сочетаний параметров закалочной среды формируется дефектная микроструктура, в которой в дополнение к мартенситу имеется троостит закалки различного типа: игольчатый, сфероидальный, в виде сетки (рис. 5). Наличие в структуре троостита закалки свидетельствует о пониженной скорости охлаждения, то есть о недостаточной охлаждающей способности закалочной среды. Вне зависимости от вида троостита проявляется его негативное влияние на твердость мелющих шаров (см. таблицу). При этом более выраженное отрицательное влияние закономерно оказывает троостит сфероидальный и в виде сетки.

В целом необходимо отметить, что качество микроструктуры шаров, закаленных в растворе «ПКМ», зна-

чительно выше по отношению к шарам, для закалки которых использовался раствор полимера «Термовит». Так, на шарах, закаленных в растворе «ПКМ» с концентрацией 2 % с температурой 40 °С, в структуре выявлен только игольчатый троостит (рис. 5, а), а в шарах, для закалки которых использовался полимер «Термовит» с аналогичной концентрацией и температурой, – сфероидальный троостит и троостит в виде сетки (рис. 5, в). При этом твердость шаров, закаленных с использованием полимера «ПКМ» с указанной концентрацией и температурой, как на поверхности, так и в сердцевине в среднем на 6 – 7 HRC выше твердости шаров, закаленных в среде полимера «Термовит» (см. таблицу).

Обобщая вышесказанное можно сделать вывод, что за счет изменения параметров полимерной закалочной среды возможно варьировать эксплуатационные характеристики мелющих шаров из рельсовой стали, определяющие потенциальные области их применения. Например, закалка шаров в растворе полимера «ПКМ» с концентрацией 2 % и температурой 20 – 30 °С обеспечивает получение шаров с высокой твердостью (IV группа твердости по ГОСТ 7524 – 2015), а использование для закалки раствора этого же полимера с концентрацией 4 % и температурой 20 – 30 °С создает возможность производства шаров с более низкой твердостью, но потенциально высокой ударостойкостью. При этом существуют варианты сочетаний концентраций полимеров «ПКМ» и «Термовит» и их температур,

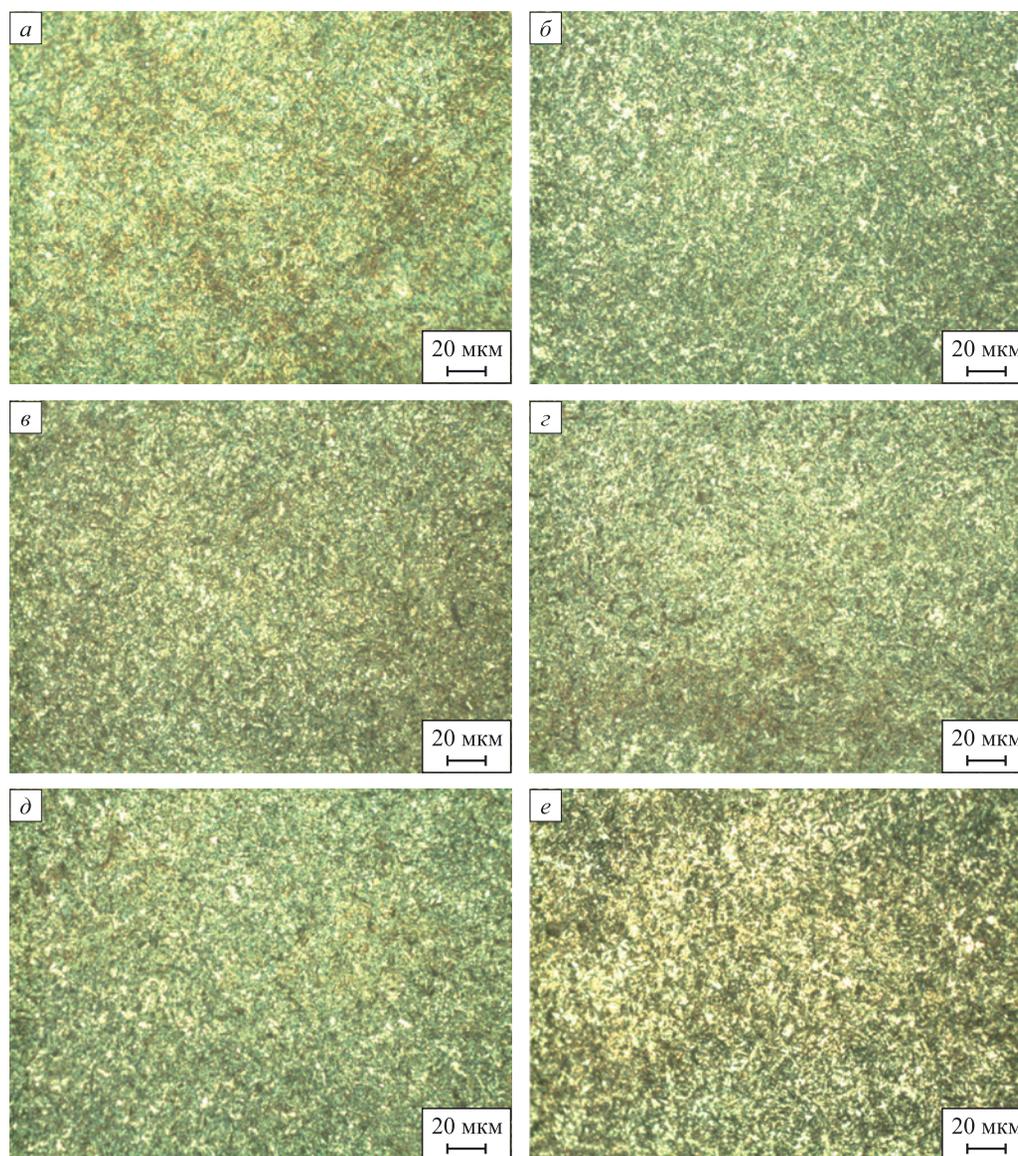


Рис. 5. Дефектная микроструктура мелющих шаров из рельсовой стали К76Ф после закалки и низкого отпуска:

a – концентрация полимера «ПКМ» 2 %, температура 40 °С;
б, в – концентрация полимера «Термовит» 2 %, температура 30 и 40 °С;
г, д, e – концентрация полимера «Термовит» 4 %, температура 20, 30 и 40 °С

Fig. 5. Defective microstructure of grinding balls made of K76F rail steel after quenching and low tempering:

a – PCM polymer concentration of 2 % at 40 °С;
б, в – Thermovit polymer concentration of 2 % at 30 and 40 °С;
г, д, e – Thermovit polymer concentration of 4 % at 20, 30 and 40 °С

применение которых не рекомендуется в связи с высоким риском получения дефектной микроструктуры.

Выводы

На основании лабораторных экспериментальных исследований построены кривые охлаждения для закалки шаров из рельсовой стали К76Ф в растворах полимеров «ПКМ» и «Термовит» с концентрацией 2 и 4 % и температурой 20–40 °С. Проведенными лабораторными экспериментальными исследованиями определены закономерности формирования микро-

структуры мелющих шаров из указанной стали при использовании полимерных закалочных сред «ПКМ» и «Термовит» с различными параметрами для термообработки. Использование раствора «ПКМ» для закалки шаров обеспечивает значительно более высокое качество микроструктуры и твердость шаров по сравнению с применением полимера «Термовит». Выработаны рекомендации по оптимальным вариантам сочетаний концентрации и температуры полимера «ПКМ», обеспечивающих получение шаров повышенной группы твердости и получение шаров более низкой твердости, но высокой ударной стойкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Улегин К.А., Шведов К.Н., Бородин А.Н., Рубцов В.Ю. Новый шаропрокатный стан ЕВРАЗ НТМК – новые возможности для потребителей. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2020;76(6):602–608.
<https://doi.org/10.32339/0135-5910-2020-6-602-608>
Ulegin K.A., Shvedov K.N., Borodin A.N., Rubtsov V.Yu. The new ball-rolling mill of EVRAZ NTMK – new possibilities for customers. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2020;76(6):602–608. (In Russ.).
<https://doi.org/10.32339/0135-5910-2020-6-602-608>
2. Shvedov K.N., Galim'yanov I.K., Kazakovtsev M.A. Production of grinding balls of high surface and normalized volume hardness. *Metallurgist*. 2020;64(5–6):499–507.
<http://dx.doi.org/10.1007/s11015-020-01019-3>
3. Stalinskii D.V., Rudyuk A.S., Solenyi V.K., Yudin A.V., Volkov K.V., Atkonova O.P. Improving the production of steel grinding balls at AO EVRAZ ZSMK. *Steel in Translation*. 2016;46(7):525–528.
<https://doi.org/10.3103/S0967091216070135>
4. Lam M.M., Serov A.I., Smyrnov Y.N., Ternavskii A.N., Mykheiev V.V. Production of hard (class V) grinding balls at PJSC “DMPZ”. *Steel in Translation*. 2017;47(5):325–329.
<https://doi.org/10.3103/S0967091217050072>
5. Адигамов Р.Р., Никишин И.А., Жителей П.С., Андреев А.Р., Карлина А.Р. 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.R. Experience in mastering the production of steel grinding balls in PJSC SEVER-STAL. *Stal'*. 2022;(3):13–18. (In Russ.).
6. Lam M.M., Serov A.I., Smirnov E.N., Ternavskii A.A., Bazarova G.S. Mastering the production of 40- and 60-mm-diam. grinding balls in hardness classes III and IV at the Donetsk Metal-Rolling Plant. *Metallurgist*. 2016;60(3-4):440–446. <http://dx.doi.org/10.1007/s11015-016-0311-x>
7. Aldrich C. Consumption of steel grinding media in mills – A review. *Minerals Engineering*. 2013;49:77–91.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2013.04.023>
8. Umucu Y., Deniz V. The effect of ball type in fine particles grinding on kinetic breakage parameters. *Inzynieria Mineralna*. 2015;16(1):197–203.
9. Song Z., Pu Y., Liu Z., Wang B. Analysis of failure of grinding balls during service. *Metal Science and Heat Treatment*. 2022;64(1-2):127–133.
<https://doi.org/10.1007/s11041-022-00772-3>
10. Рахутин М.Г., Бойко П.Ф. Пути совершенствования методов оценки основных характеристик мелющих шаров. *Уголь*. 2017;12:49–52.
<http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2017-12-49-52>
Rakhutin M., Boiko P. Ways to improve assessment methods of the main characteristics of grinding balls. *Ugol'*. 2017;(12):49–52.
<http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2017-12-49-52>
11. 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 the consumption of steel grinding balls by improving their production technology. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedenii Chernozem'ya*. 2016;4(46):78–86. (In Russ.).
12. Сычков А.Б., Стеблов А.Б., Березнов С.Н. О выборе материала и режимов термической обработки стальных мелющих шаров, отвечающих требованиям современного мирового рынка. *Литье и металлургия*. 2013;(3(71)):30–32.
Syckov A.B., Steblov A.B., Bereznov S.N. The choice of material and heat treatment regimes of steel grinding balls, meeting the requirements of the modern global market. *Lit'e i metallurgiya*. 2013;(3(71)):30–32. (In Russ.).
13. Umansky A.A., Golovatenko A.V., Prudnikov A.N. Analysis of the main trends in the development of the production of grinding balls in Russia and abroad. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;866(1):012032.
<http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/866/1/012032>
14. 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>
15. Bouhamla K., Bourebia M., Gharbi A., Maouche H., Chaour M., Belhadi S. Effect of heat treatment on tribological behavior of forged steel balls. *AIP Conference Proceedings*. 2019;2123(1):030004. <https://doi.org/10.1063/1.5117035>
16. Титов С.С., Мещеряков В.Н., Леушин И.О., Федоров О.В. Разработка технологии и оборудования для индукционной осесимметричной закалки мелющих стальных шаров. *Черные металлы*. 2020;(6):11–16.
Titov S.S., Meshcheryakov V.N., Leushin I.O., Fedorov O.V. Development of technology and equipment for induction axisymmetric hardening of grinding steel balls. *Chernye metally*. 2020;(6):11–16. (In Russ.).
17. Smirnov E.N., Smirnov A.N., Mikheev V.V., Sklyar V.A., Belevitin V.A., Verzilov A.P., Orlov G.A. The exploration of the possibility of using continuous-cast 55 grade steel in the manufacturing of 40-mm-in-diameter grinding balls of IV and V hardness class. *Steel in Translation*. 2020;50(4):270–276. <https://doi.org/10.3103/S0967091220040099>
18. Stalinskii D.V., Rudyuk A.S., Solenyi V.K. Development of production and estimation of the efficiency of using high-quality grinding balls. Report 1. Mastering the production of balls from chromium–molybdenum steel. *Steel in Translation*. 2021;51(11):822–826.
<https://doi.org/10.3103/S0967091221110127>
19. Ефременко В.Г. Металлографический анализ причин разрушения стальных катаных тел для барабанных мельниц. *Вестник Приазовского государственного технического университета*. 2000;(9):89–91.
Efremenko V.G. Metallographic analysis of the causes of destruction of steel rolled bodies for drum mills. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2000;(9):89–91. (In Russ.).
20. Umanskii A.A., Temlyantsev M.V., Oskolkova T.N., Simachev A.S., Golovatenko A.V. Study of grinding ball quality properties during manufacture in a screw rolling mill. *Metallurgist*. 2019;63(5-6):578–584.
<http://dx.doi.org/10.1007/s11015-019-00863-2>
21. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T., Andrietti S., Barbelet M. An innovative method for producing balls from scrap rail heads.

The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018;97(1-4):893–901.

<https://doi.org/10.1007/s00170-018-2007-9>

22. Tomczak J., Pater Z., Bulzak T. The flat wedge rolling mill for forming balls from heads of scrap railway rails. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2018;63(1):5–12.

<http://dx.doi.org/10.24425/118901>

23. Уманский А.А., Симачев А.С., Думова Л.В. Разработка технологии производства мелющих тел с повышенными эксплуатационными свойствами из отбраковки рельсовых сталей. *Черные металлы*. 2021;(5):57–61.

<http://doi.org/10.17580/chm.2021.05.10>

Umanskiy A.A., Simachev A.S., Dumova L.V. Development of technology for production of grinding bodies with

improved performance properties from the rail steels rejection. *Chernye Metally*. 2021;(5):57–61.

<http://doi.org/10.17580/chm.2021.05.10>

24. Efremenko V.G., Popov E.S., Kuz'min S.O., Trufanova O.I., Efremenko A.V. Introduction of three-stage thermal hardening technology for large diameter grinding balls. *Metallurgist*. 2014;57(9-10):849–854.

<http://doi.org/10.1007/s11015-014-9812-7>

25. Zurnadzy V.I., Efremenko V.G., Wu K.M., Lekatou A.G., Shimizu K., Chabak Yu.G., Zotov D.S., Dunayev E.V. Quenching and partitioning-based heat treatment for rolled grinding steel balls. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2020;51(1-4):3042–3053.

<https://doi.org/10.1007/s11661-020-05737-w>

Сведения об авторах

Information about the Authors

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

E-mail: 5745426@gmail.com

Артем 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

Любовь Валерьевна Думова, соискатель степени к.т.н. кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: doumova@bk.ru

Сергей Олегович Сафонов, ассистент кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: sergey.safonov.1950@mail.ru

Aleksandr A. Umanskiy, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy, 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, 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. "EVRAZ ZSMK", Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-9712-3757

E-mail: simachev_as@mail.ru

Lyubov' V. Dumova, Candidates for a degree of Cand. Sci. (Eng.) of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University

E-mail: doumova@bk.ru

Sergei O. Safonov, Assistant of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University

E-mail: sergey.safonov.1950@mail.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

А. А. Уманский – разработка плана исследований, анализ механизмов формирования микроструктуры и механических свойств мелющих шаров, формулирование основных выводов.

В. В. Байдин – обобщение результатов экспериментальных исследований охлаждающей способности полимерных закалочных сред и микроструктуры мелющих шаров.

А. С. Симачев – проведение металлографических исследований микроструктуры и анализа твердости мелющих шаров до и после термообработки.

Л. В. Думова – проведение аналитического обзора по тематике исследования, оформление материалов статьи.

С. О. Сафонов – проведение исследований охлаждающей способности полимерных закалочных сред при варьировании их концентраций и температуры.

A. A. Umanskiy – development of a research plan, analysis of mechanisms of formation of the microstructure and mechanical properties of grinding balls, formulation of conclusions.

V. V. Baidin – generalization of the results of experimental studies on cooling capacity of polymer quenching media and microstructure of grinding balls.

A. S. Simachev – metallographic studies of microstructure and hardness analysis of grinding balls before and after heat treatment.

L. V. Dumova – conducting an analytical review on the article topic, design of the article.

S. O. Safonov – conducting studies of cooling capacity of polymer quenching media with varying concentrations and temperatures.

Поступила в редакцию 28.08.2023

После доработки 11.09.2023

Принята к публикации 29.09.2023

Received 28.08.2023

Revised 11.09.2023

Accepted 29.09.2023