

ISSN 0132-0890
www.rudmet.ru

ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Издается с 1961 года
(№ 1101)

09.2023



Тема номера:

100 лет кафедре

"Обработка металлов давлением"

Уральского федерального университета (стр. 4-46)

ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Издательский дом
«Руда и Металлы»

№ 9 (1101), сентябрь 2023 г.

Издается с 1961 г.

Ежемесячный научно-технический и производственный журнал
по актуальным проблемам металлургии и машиностроения

Учредители:

Акционерное общество
«Издательский дом
«Руда и Металлы»

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»

Федеральное бюджетное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Магнитогорский государственный технический
университет им. Г. И. Носова»

При участии:

ПАО «ММК»
ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия»
имени С. П. Королева»
ОАО «БМЗ — управляющая компания холдинга «БМК»
ФГБУК «Государственный Эрмитаж»

Официальный информационный орган
Федерального УМО
«Технологии материалов»

Редакционный совет:

Главный редактор: В. М. Колокольцев
Первый зам. главного редактора: К. Л. Косырев
Зам. главного редактора: Е. В. Цирульников, А. Г. Воробьев
А. М. Беленький, В. Блек (Германия), Ю. Л. Бобарикин (Беларусь), О. И. Борискин, И. В. Буторина,
Р. М. Валеев, Е. П. Волынкина, А. В. Выдрин, С. П. Галкин, Е. А. Голи-Оглу (Дания), Я. М. Гордон (Канада),
Д. Г. Еланский, Н. А. Зюбан, И. Е. Илларионов, Л. М. Капуткина, А. А. Казаков, А. П. Коликов,
С. В. Коновалов, А. Г. Корчунов, А. В. Кушнарв, И. О. Леушин, И. П. Мазур, Т. Н. Матвеева, А. В. Мунтин,
А. Е. Пелевин, Ю. Ю. Пиотровский, И. М. Потравный, А. Н. Савенок (Беларусь), А. В. Серебряков,
Е. Ю. Сидорова, И. А. Султангузин, А. Я. Травянов, А. С. Харченко, Н. А. Чиченев, М. В. Чукин,
И. В. Чуманов, А. Н. Шаповалов, П. Шеллер (Германия), Е. А. Яценко

Редакция:

Зам. главного редактора: Е. В. Цирульников
Ответственный секретарь: Е. Ю. Рахманова

Издатель — АО «Издательский дом «Руда и Металлы»
Адрес издателя: 119049, Москва, Ленинский просп., 6,
стр. 2, МИСиС, оф. 622

Адрес редакции:

• фактический: 119049, Москва, Ленинский проспект 6,
стр. 2, МИСиС, оф. 617
• почтовый: 119049, Москва, а/я № 71
Телефон/факс: (495) 955-01-75
Эл. почта: chernet@rudmet.ru, tsirulnikov@rudmet.ru

www.rudmet.ru

Ежемесячный научно-технический и производственный журнал
по актуальным проблемам металлургии и машиностроения
«Черные металлы» № 9 (1101), сентябрь 2023 г.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере
связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
(Свидетельство ПИ № ФС77-48681 от 28.02.2012 г.)

Товарный знак и название «Черные металлы» являются исключительной
собственностью Издательского дома «Руда и Металлы»

Отпечатано с предоставленных готовых файлов
в типографии «Канцлер»
150044, Россия, Ярославль, ул. Полушкина Роща, 16, стр. 66А.
Тел. (4852) 58-76-33

Дата выхода в свет: 28.09.2023. Формат 60x90/8.
Печ. л. 12,25. Офсетная печать. Бумага офсетная.
Тираж 800 экз. Цена свободная

За достоверность рекламной информации ответственность несет рекламодатель
За достоверность научно-технической информации ответственность несет автор
Перепечатка материалов возможна только с письменного разрешения редакции
При перепечатке ссылка на «Черные металлы» обязательна
«Реклама» — материал публикуется на правах рекламы
Публикуемые материалы не обязательно отражают точку зрения редакции
и редсовета журнала

Подписной индекс:
12985 («Пресса России»)

ISSN 0132-0890



9 770132 089006 >

СОДЕРЖАНИЕ

100 лет кафедре «Обработка металлов давлением» Уральского федерального университета

<i>Д. Л. Шварц, Ю. Н. Логинов.</i> 100 лет со дня основания кафедры «Обработка металлов давлением» Уральского федерального университета	4
<i>О. А. Панасенко, Д. Ш. Нухов, А. О. Халезов.</i> Оценка влияния технологических параметров винтовой прошивки на качество гильзы и стабильность ведения процесса.	9
<i>Д. А. Павлов.</i> Исследование влияния угла раскатки на энергосиловые и скоростные параметры винтовой прошивки с использованием компьютерного моделирования	15
<i>С. В. Мыльников, Р. Ф. Исаков, Д. Л. Шварц.</i> Анализ напряженно-деформированного состояния при правке асимметричных профилей.	19
<i>С. О. Непряхин, М. Г. Мартынов.</i> Повышение точности калиброванного проката на основе изменения геометрии волоочильного канала	23
<i>Г. В. Шимов, Ю. Н. Логинов, Н. И. Бушуева.</i> Переработка немерных отрезков труб с получением холоднокатаной ленты	29
<i>Д. Р. Салихьянов.</i> Исследование напряженно-деформированного состояния на границе между материалами при прокатке слоистого композита.	34
<i>Б. Н. Гузанов, Н. Б. Пугачева, Е. Ю. Слукин, С. М. Никифорова.</i> Роль поверхностных явлений при деформации и разрушении газотурбинных лопаток и штампового инструмента в условиях интенсивного механотермического нагружения.	40

Прокатка и термообработка

<i>С. П. Галкин, Ю. В. Гамин, Т. Ю. Кин, С. А. Костин.</i> Экспериментальное опробование радиально-сдвиговой прокатки для получения деформированного сплава системы Co – Cr – Mo	47
<i>А. А. Уманский, А. С. Симачев, Л. В. Думова, С. О. Сафонов.</i> Исследования влияния параметров закалочной среды в процессе термообработки мелющих шаров из рельсовой стали на качество их микроструктуры и твердость	54

10 лет кафедре проектирования и эксплуатации металлургических машин и оборудования МГТУ им. Г. И. Носова

<i>Т. В. Усатая, Л. В. Дерябина, М. В. Андросенко, А. Г. Корчунов.</i> Иммерсивные технологии в промышленном дизайне оборудования	60
<i>М. Г. Слободянский.</i> Прогнозирование долговечности барабанного окомкователя по критерию прочности неприводных опорных катков на стадии проектирования и эксплуатации	66
<i>Н. Ш. Тютяряков, А. С. Савинов.</i> Исследование износостойкости роликов валковой арматуры сортовых станов ПАО «ММК» с целью замены на отечественные аналоги	75
<i>Д. В. Константинов, А. Г. Корчунов, Е. М. Огнева, М. А. Полякова.</i> Исследование 3D-печати деталей машиностроения порошком из стали с TRIP-эффектом.	82
<i>А. В. Анцупов мл., А. В. Анцупов, В. П. Анцупов, Е. С. Рыскина.</i> Уточнение методики аналитической оценки контактного взаимодействия элементов систем валки – полоса четырехвалковых клетей	89

Литейное производство

<i>И. О. Леушин, Л. И. Леушина, О. С. Кошелев, П. А. Горохов.</i> Производство тонкостенных чугуновых отливок каркасно-ячеистой и упорядоченной сотовой конструкции.	95
К 60-летию Игоря Олеговича Леушина.	III стр. обл.

Журнал "Черные металлы"

по решению ВАК Министерства образования и науки РФ включен в
"Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук"

Исследования влияния параметров закалочной среды в процессе термообработки мелющих шаров из рельсовой стали на качество их микроструктуры и твердость

А. А. Уманский, директор Института металлургии и материаловедения¹, докт. техн. наук, доцент,
эл. почта: umanski@bk.ru

А. С. Симачев, директор Центра коллективного пользования «Материаловедение»¹, канд. техн. наук,
эл. почта: simachev_as@mail.ru

Л. В. Думова, ведущий инженер Центра коллективного пользования «Материаловедение»¹,
эл. почта: doumova@bk.ru

С. О. Сафонов, аспирант¹

¹Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.

С целью разработки оптимальных режимов термической обработки мелющих шаров из рельсовой стали марки К76Ф проведена серия лабораторных экспериментальных исследований охлаждающей способности полимерной водорастворимой закалочной среды ПКМ (полимерный композиционный материал производства ООО «Политерм-Тюмень») при варьировании ее концентрации и температуры и выполнен анализ микроструктуры мелющих шаров, термообработанных с использованием указанной закалочной среды. Установлено, что при концентрации ПКМ в водном растворе от 2 до 4 % скорость охлаждения стали К76Ф при температурах закалочной среды в диапазоне 20–30 °С практически не изменяется и снижается при достижении температуры 40 °С. На основании металлографических исследований определены особенности микроструктуры мелющих шаров из стали К76Ф после термической обработки, проведенной с использованием полимерной закалочной среды ПКМ при ее различных концентрации и температуре. Выявлено, что варьирование параметров указанной закалочной среды позволяет получать шары с различным комплексом свойств. В частности, применение в качестве закалочной среды 2%-го раствора полимера ПКМ при температуре в диапазоне 20–30 °С обеспечивает получение шаров высокой твердости (IV группы твердости по ГОСТ 7524–2015), а использование 4%-го раствора ПКМ при температуре 20–30 °С приводит к получению шаров более низкой твердости (I и II группы твердости по ГОСТ 7524–2015), но повышенной ударной стойкости.

Ключевые слова: закалочная среда, мелющие шары, рельсовая сталь, микроструктура, твердость.

DOI: 10.17580/chm.2023.09.09

Введение

Мелющие шары являются одним из наиболее востребованных видов стального металлопроката, что связано с широкой областью их применения. В частности, их используют для измельчения исходных материалов в таких высокопроизводительных отраслях, как металлургическая, горно-рудная и цементная промышленность [1, 2]. Такие мелющие шары изготавливают как из специализированных шаровых сталей, так и из углеродистых [3, 4] или легированных [5, 6], основным назначением которых является производство других видов проката. При этом в случае производства мелющих шаров из неспециализированных шаровых марок сталей достаточно часто используют отбракованные заготовки. Например, широкое распространение имеет производство мелющих шаров из отбракованных заготовок рельсовых сталей [7, 8] или отбраковки готовых рельсов [9–11].

Для всего марочного сортамента мелющих шаров технология их производства включает термообработку после

горячей прокатки, так как одним из основных требований к свойствам мелющих шаров является их высокая твердость [12, 13]. На практике используют два варианта термической обработки мелющих шаров [14–16]. В первом случае выполняют закалку шаров с прокатного нагрева с последующим их самоотпуском на воздухе, во втором — после закалки проводят низкий отпуск шаров. Более предпочтительным является второй вариант, так как он обеспечивает снятие закалочных напряжений, что способствует повышению ударной стойкости шаров и тем самым увеличивает их эксплуатационный ресурс. Также имеются данные об использовании для производства шаров большого диаметра (100 мм и более) технологии трехстадийного термоупрочнения (прерванной закалки) [17].

Твердость и ударная стойкость мелющих шаров в значительной степени определяются параметрами закалочной микроструктуры [18, 19], формирование которой, в свою очередь, в значительной степени зависит от химического состава и температуры закалочной среды [20].

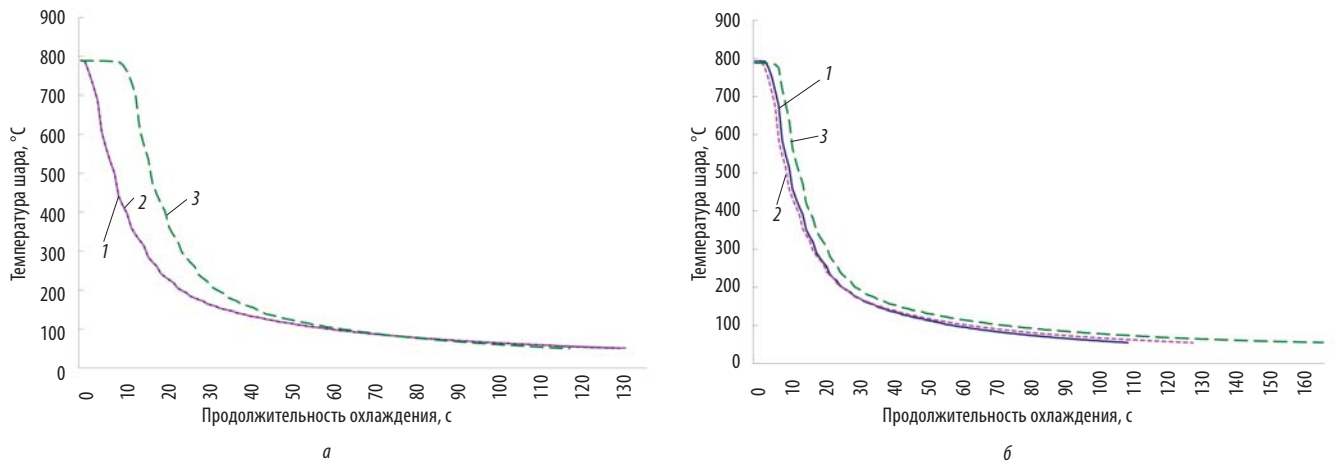


Рис. 1. Кривые охлаждения рельсовой стали К76Ф при закалке в водном растворе полимера ПКМ концентрации 2 (а) и 4 (б) % при различных температурах закалочной среды, °С: 1 — 20; 2 — 30; 3 — 40

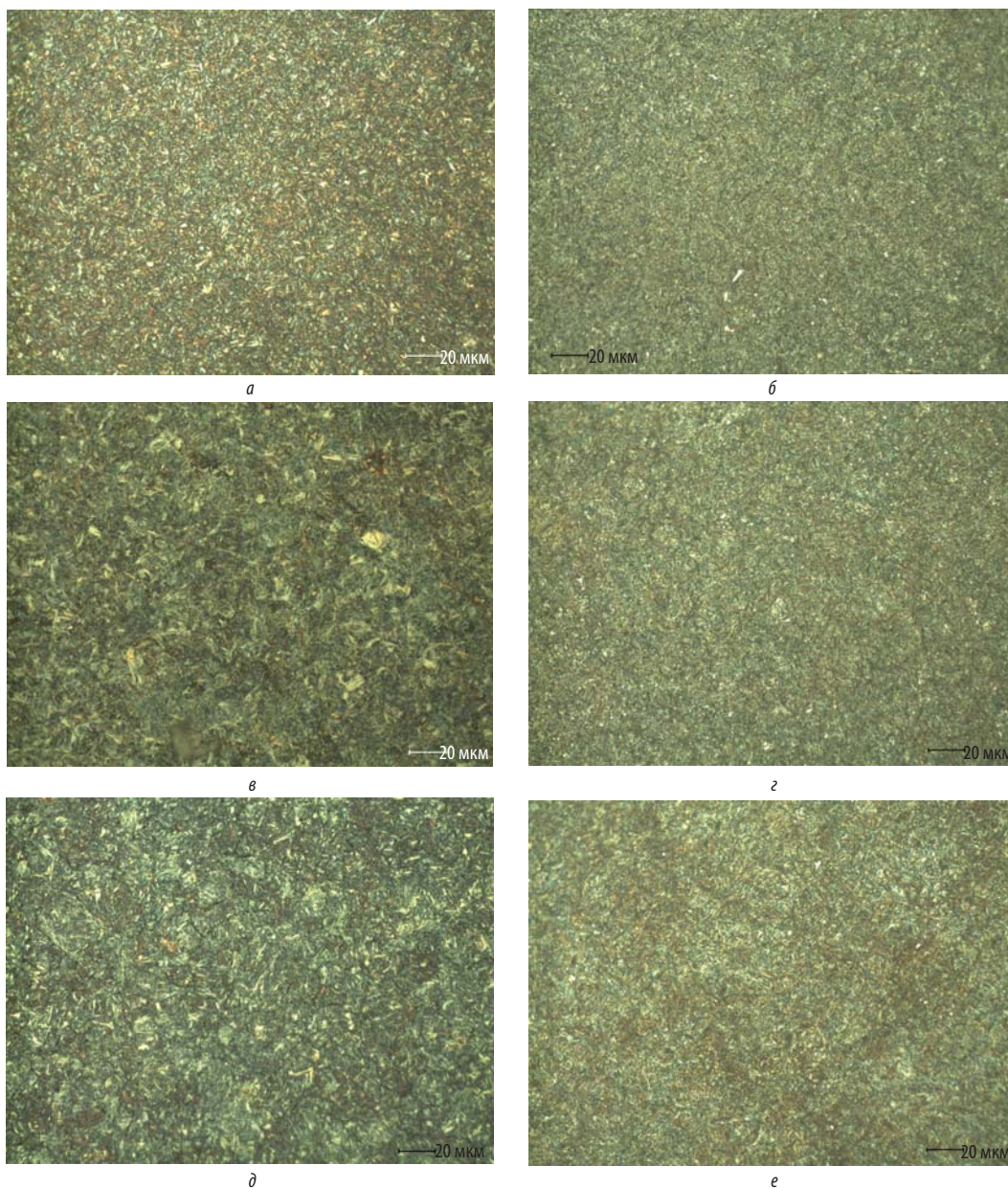


Рис. 2. Микроструктура мелющих шаров из рельсовой стали марки К76Ф после закалки в водном растворе полимера ПКМ концентрации 2 %: а, в, д — после закалки с температурой закалочной среды 20, 30 и 40 °С соответственно; б, з, е — после закалки с температурой закалочной среды 20, 30 и 40 °С соответственно и последующего низкого отпуска

В настоящее время в качестве закалочной среды для производства мелющих шаров применяют воду, индустриальное масло и полимеры. При этом достоинством полимерных закалочных сред является возможность регулирования их охлаждающей способности в широких пределах за счет разбавления водой до различных концентраций. В результате для каждой конкретной марки стали возможен подбор концентрации полимера, обеспечивающей формирование оптимальной закалочной микроструктуры и, как следствие, повышенной твердости и ударостойкости производимых мелющих шаров.

В рамках представленной работы проведены экспериментальные исследования влияния концентрации и температуры полимерной закалочной среды ПКМ (полимерный композиционный материал производства ООО «Политерм-Тюмень») на формирование микроструктуры мелющих шаров при их производстве из отбраковки рельсовой стали марки К76Ф.

Целью данной работы является обоснование оптимальных параметров полимерной закалочной среды ПКМ для производства мелющих шаров из рельсовой стали с различным сочетанием их механических и эксплуатационных свойств (твердость, ударная стойкость) и, соответственно, различными областями их применения.

Материалы и методика исследований

Экспериментальные исследования влияния параметров термообработки мелющих шаров из рельсовой стали на формирование их микроструктуры проводили в лабораторных условиях. В качестве объекта исследований использовали мелющие шары производства ОАО «Гурьевский металлургический завод», прокатанные из отбраковки заготовок рельсовой стали марки К76Ф химического состава, % (мас.) [21]: 0,71–0,82 С; 0,75–1,25 Мn; 0,25–0,60 Si;

0,03–0,15 V; <0,20 Cr; <0,020 P; <0,020 S; <0,004 Al. Для проведения исследований в линии стана отбирали шары, не подвергавшиеся термической обработке: после прокатки, но до закалки.

Исследования выполнены в два этапа. На первом этапе изучали охлаждающую способность полимерной закалочной среды ПКМ в зависимости от ее температуры и концентрации с использованием установки «Комптон», включающей цифровой термометр и датчик температуры. При работе установки в автоматическом режиме осуществляется запись измеренных значений температуры с заданным интервалом времени, и на основании полученных данных при помощи программы TC Soft на персональном компьютере автоматически строятся кривые охлаждения. При исследовании охлаждающей способности проводили нагрев мелющих шаров до температуры закалки в лабораторной печи с их последующим охлаждением в баке с закалочной средой. Температуру закалки выбирали с учетом фактического химического состава мелющих шаров: на 30–50 °С выше критической точки A_{C3} для шаров из доэвтектоидной стали и на 30–50 °С выше критической точки A_{C1} для шаров из заэвтектоидной стали. Фактический химический состав шаров определяли с использованием рентгенофлуоресцентного волнодисперсионного спектрометра Shimadzu XRF-1800.

При проведении экспериментов температура охлаждающей среды составляла 20, 30 и 40 °С, концентрация полимера ПКМ — 2 и 4 %. Постоянство температуры закалочной среды в баке в ходе проведения экспериментов контролировали в процессе охлаждения путем принудительного охлаждения в случае разогрева на величину, превышающую нормативное значение на более чем 3 °С.

На втором этапе проводили исследования микроструктуры мелющих шаров при варьировании температуры

Зависимость твердости HRC мелющих шаров из рельсовой стали К76Ф после термообработки от параметров закалочной среды

Температура закалочной среды, °С	Концентрация ПКМ, %			
	2		4	
	закалка	закалка + отпуск	закалка	закалка + отпуск
Поверхностная твердость				
20	55–57	54–56	50–52	48–51
30	54–55	53–55	49–51	47–49
40	51–52	50–52	53–55	48–50
Требования ГОСТ 7524–2015 [22] для шаров диаметром 60 мм по группам твердости, HRC				
I группа	≥43			
II группа	≥48			
III группа	≥53			
IV группа	≥53			
Твердость сердцевины (½ радиуса)				
20	54–56	52–54	50–52	48–51
30	51–52	51–53	49–51	47–49
40	50–52	50–51	53–55	48–50
Требования ГОСТ 7524–2015 [22] для шаров диаметром 60 мм по группам твердости, HRC				
I, II, III группы	–			
IV группа	>43			

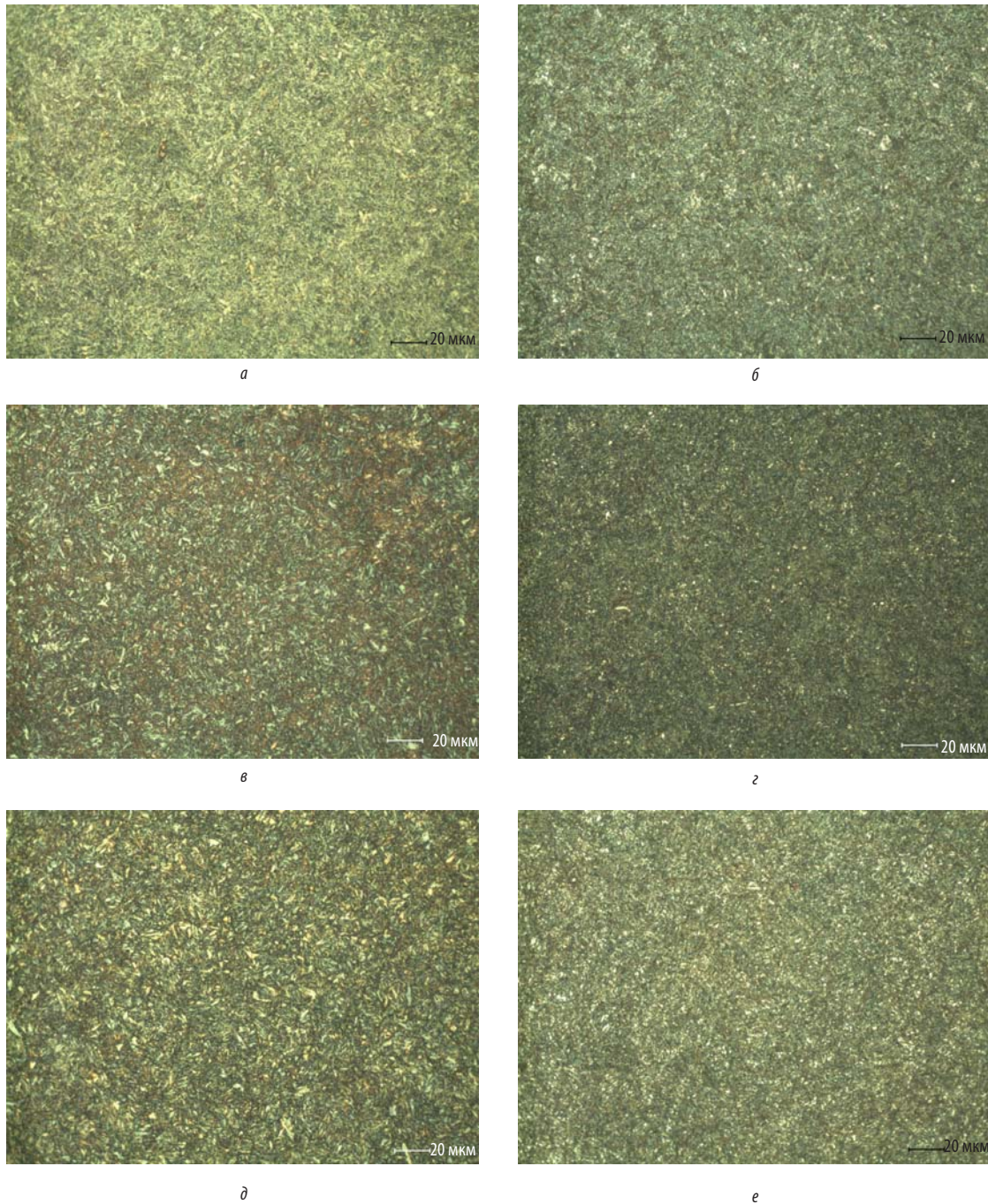


Рис. 3. Микроструктура мелющих шаров из рельсовой стали марки К76Ф после закалки в водном растворе полимера ПКМ концентрации 4 %: а, в, д — после закалки при температуре закалочной среды 20, 30 и 40 °С соответственно; б, г, е — после закалки при температуре закалочной среды 20, 30 и 40 °С соответственно и последующего низкого отпуска

закалочной среды и концентрации полимера в указанных пределах. С этой целью шары предварительно разрезали на равные доли, исследовали их исходную микроструктуру, после чего одну из долей каждого шара подвергали закалке, а вторую — закалке с последующим низким отпуском. Доли шаров после закалки и полного цикла термообработки (закалка + низкий отпуск) также подвергали металлографическим исследованиям с использованием оптического микроскопа Olympus GX51. Твердость поверхности и сердцевины всех шаров измеряли твердометром ТК-2М.

Результаты исследований и их обсуждение

В ходе исследования охлаждающей способности полимерной закалочной среды ПКМ установлено, что при концентрациях полимера ПКМ в водном растворе 2 и 4 % скорость охлаждения при температурах закалочной среды 20 и 30 °С практически не изменяется и снижается при достижении температуры 40 °С (**рис. 1**).

Анализ микроструктуры мелющих шаров после закалки и полного цикла термообработки (закалка + низкий отпуск) с различными параметрами закалочной среды показал,

Заключение

что во всех изучаемых вариантах имеет место сквозная прокаливаемость — фазовый состав по объему каждого шара (поверхность, расстояние $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ радиуса от поверхности и сердцевина) является неизменным. При этом в зависимости от параметров закалочной среды формируются три варианта закалочных микроструктур. При концентрации ПКМ 2 % и температурах закалочной среды 20 и 30 °С микроструктура шаров как после закалки (рис. 2, а, в), так и после закалки с последующим низким отпускком (см. рис. 2, б, д) представляет мартенсит + карбиды + аустенит остаточный высокой твердости (таблица). Повышение температуры закалочной среды до 40 °С приводит к формированию второго варианта микроструктуры, когда кроме мартенсита появляется игольчатый троостит (см. рис. 2, д, е), закономерно снижающий твердость шаров (см. таблицу).

Формирование троостита закалки обусловлено низкой скоростью охлаждения, что подтверждают полученные графические зависимости (см. рис. 1, а). Наличие структуры мартенсит + троостит приводит к повышению неравномерности механических свойств, что увеличивает вероятность образования трещин по разделам фаз при ударных нагрузках, т. е. снижает эксплуатационные характеристики мелющих шаров. Таким образом, можно констатировать, что при использовании в качестве закалочной среды 2%-го раствора полимера ПКМ температурой 40 °С формируется дефектная микроструктура мелющих шаров, обусловленная недостаточной скоростью охлаждения в процессе закалки.

При использовании 4%-го полимера ПКМ и температурах закалочной среды 20 и 30 °С формируется третий вариант микроструктуры троостомартенсит + карбиды + аустенит остаточный (рис. 3, а–з). Данная микроструктура не является дефектной, так как троостомартенсит является однофазной структурой и, соответственно, отсутствуют приведенные выше недостатки двухфазной структуры мартенсит + троостит. Троостомартенсит сочетает высокие прочность и ударную вязкость, при этом его твердость несколько ниже, чем у мартенситной структуры (см. таблицу). При использовании в качестве закалочной среды 4%-го раствора ПКМ температурой 40 °С формируется первый вариант структуры мартенсит + карбиды + аустенит остаточный (см. рис. 3, д, е). При этом ее твердость несколько ниже, чем у аналогичной структуры, полученной при закалке в 2%-м растворе ПКМ температурой 20 и 30 °С (см. таблицу).

Анализ результатов металлографических исследований показал, что применение полимера ПКМ в качестве закалочной среды для термообработки мелющих шаров из рельсовой стали К76Ф позволяет в зависимости от его концентрации и температуры закалочной среды получать шары, соответствующие требованиям различных областей их применения. Использование 2%-го раствора ПКМ температурой 20 и 30 °С гарантирует получение шаров высокой твердости (соответствующих IV группе твердости по ГОСТ 7524–2015 [22]), а применение 4%-го раствора ПКМ данных температур обеспечивает получение шаров меньшей твердости (соответствующей I и II группам твердости по ГОСТ 7524–2015 [22]), но потенциально более высокой ударной стойкости, обусловленной параметрами их микроструктуры (наличие структуры троостомартенсита).

На основании результатов лабораторных экспериментальных исследований определены оптимальные параметры полимерной закалочной среды ПКМ для термообработки мелющих шаров из рельсовой стали марки К76Ф в зависимости от области их применения. Применение в качестве закалочной среды водного 2%-го раствора полимера ПКМ с температурой в диапазоне 20–30 °С обеспечивает получение шаров IV группы твердости по ГОСТ 7524–2015 [22], а использование 4%-го раствора ПКМ — шаров I и II группы твердости указанного ГОСТа, но потенциально повышенной ударной стойкости. ЧМ

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

Библиографический список

1. Крутилин А. Н., Бестужев Н. И., Бестужев А. Н., Каленкович Д. Н. Мелющие тела. Проблемы. Перспективы // *Литье и металлургия*. 2009. № 4 (53). С. 26–33.
2. Рахутин М. Г., Бойко П. Ф. Пути совершенствования методов оценки основных характеристик мелющих шаров // *Уголь*. 2017. № 12. С. 49–51.
3. Лам М. М., Серов А. И., Смирнов Е. Н., Тернавский А. А., Базарова Г. С. Промышленные испытания мелющих шаров IV группы твердости производства ПАО «Донецкий металлопрокатный завод» // *Металлург*. 2016. № 9. С. 63–67.
4. Смирнов Е. Н., Смирнов А. Н., Михеев В. В., Скляр В. А. и др. Оценка применимости непрерывнолитой стали марки 55 при производстве мелющих шаров диаметром 40 мм групп твердости IV и V // *Сталь*. 2020. № 4. С. 44–49.
5. Сталинский Д. В., Рудюк А. С., Солень В. К. Освоение производства и оценка эффективности использования высококачественных мелющих шаров. Сообщение 1. Освоение производства шаров из хромомолибденовой стали // *Сталь*. 2021. № 11. С. 36–39.
6. 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 Черноморья*. 2016. № 4 (46). С. 78–86.
7. 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. С. 57–62.
8. Баранов Н. А., Тулунов О. Н. Производство мелющих шаров из рельсовой стали // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования*. 2017. Т. 1. С. 96–99.
9. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T., Andrietti S., Barbelet M. An innovative method for producing balls from scrap rail heads // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 97, Iss. 1–4. P. 893–901.
10. 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. Vol. 63, Iss. 1. P. 5–12.
11. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T. A cross wedge rolling process for forming 70 mm diameter balls from heads of scrap railway rails // *Procedia Manufacturing 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, Faim2017*. 2017. Vol. 11. P. 466–473.
12. Camurri C., Carrasco C., Colàs R. Improving the working life of steel grinding balls by optimizing their hardness and tenacity // *Materials Science Forum*. 2014. Vol. 783. P. 2260–2265.
13. Сталинский Д. В., Рудюк А. С., Солень В. К. Оценка влияния твердости мелющих шаров на износ и эффективность процесса измельчения железистых кварцитов // *Экология и промышленность*. 2019. № 1 (58). С. 69–76.

14. Bai X., Jin Y. Heat treatment of wear resistant steel ball for large ball mill // *Heat Treatment of Metals*. 2017. Vol. 42, Iss. 5. P. 193–196.
15. Сталинский Д. В., Рудюк А. С., Солёный В. К. Выбор материала и технологической термической обработки мелющих шаров, работающих преимущественно в условиях абразивного износа // *Сталь*. 2017. № 6. С. 64–69.
16. 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.
17. Ефременко В. Г., Попов Е. С., Кузьмин С. О., Руфанова О. И., Ефременко А. В. Внедрение технологии трехстадийного термоупрочнения мелющих шаров большого диаметра // *Металлург*. 2013. № 9. С. 88–92.
18. Ефременко В. Г. Металлографический анализ причин разрушения стальных катаных тел для барабанных мельниц // *Вестник Приазовского государственного технического университета*. 2000. № 9. С. 89–91.
19. Arlazarov A., Bouaziz O., Masse J. P., Kegel F. Characterization and modeling of mechanical behavior of quenching and partitioning steels // *Materials Science and Engineering: A*. 2015. Vol. 620. P. 293–300.
20. Айсат С., Садэддин А., Брайдай М. А., Юнус Р. и др. Влияние термической обработки на твердость и износ мелющих шаров // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2017. № 5 (743). С. 34–38.
21. ГОСТ 51685–2013. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия. — Введ. 01.07.2014.
22. ГОСТ 7524–2015. Шары мелющие стальные для шаровых мельниц. — Введ. 01.11.2016.

"Chernye metally", 2023, No. 9, pp. 54–59
DOI: 10.17580/chm.2023.09.09

Investigation of the influence of hardening medium parameters during heat treatment of grinding balls from rail steel on the quality of their microstructure and hardness

Information about authors

A. A. Umansky, Dr. Eng., Associate prof., Director of the Institute of Metallurgy and Materials Science¹, e-mail: umanskii@bk.ru;

A. S. Simachev, Cand. Eng., Director of the Center for Collective Use "Materials Science"¹, e-mail: simachev_as@mail.ru;

L. V. Dumova, Leading Engineer, Center for Collective Use "Materials Science"¹, e-mail: doumova@bk.ru;

S. O. Safonov, Postgraduate Student¹

¹Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.

Abstract: In order to develop optimal modes of heat treatment of grinding balls made of K76F grade rail steel, a series of laboratory experimental studies were carried out, in which the cooling capacity of the polymer water-soluble quenching medium PCM was studied with varying its concentration and temperature, and the microstructures of grinding balls heat-treated using the specified quenching medium were analyzed. Studies of the cooling capacity of the polymer quenching medium PCM have shown that at a concentration of the specified polymer in an aqueous solution at a level of 2% to 4%, the cooling rate of K76F steel at temperatures of the quenching medium in the range of 20–30 °C practically does not differ and decreases when the temperature reaches 40 °C. On the basis of metallographic studies, the features of the microstructure of grinding balls made of K76F steel after heat treatment carried out using a polymer quenching medium PCM at its various concentrations and temperatures were determined. As a result, it was found that varying the parameters of the specified quenching medium makes it possible to obtain balls with a different set of properties. In particular, the use of a 2% polymer solution PCM with a temperature in the range of 20–30 °C as a quenching medium ensures the production of balls of high hardness (IV hardness group according to GOST 7524–2015), and the use of a 4% solution of PCM with a temperature of 20–30 °C leads to the production of balls of lower hardness (I and II hardness groups according to GOST 7524–2015), but with increased impact resistance.

Key words: quenching medium, grinding balls, rail steels, hardening, microstructure, hardness.

The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 22-29-20170, grant of the Kemerovo region – Kuzbass.

References

1. Krutilin A. N., Bestuzhev N. I., Bestuzhev A. N., Kalenkovich D. N. Grinding bodies. Problems. prospects. *Lityo i metallurgiya*. 2009. No. 4 (53). pp. 26–33.
2. Rakhutin M. G., Boyko P. F. Ways to improve methods for assessing the main characteristics of grinding balls. *Ugol*. 2017. No. 12. pp. 49–51.
3. Lam M. M., Serov A. I., Smirnov E. N., Ternavsky A. A., Bazarova G. S. Industrial testing of grinding balls of the IV hardness group produced by PJSC Donetsk Metal Rolling Plant. *Metallurg*. 2016. No. 9. pp. 63–67.
4. Smirnov E. N., Smirnov A. N., Mikheev V. V., Sklyar V. A. et al. Evaluation of the applicability of continuously cast steel grade S5 in the production of grinding balls with a diameter of 40 mm, IV and V hardness groups. *Stal*. 2020. No. 4. pp. 44–49.
5. Stalinskiy D. V., Rudyuk A. S., Solenyi V. K. Mastering the production and evaluating the efficiency of using high-quality grinding balls. Message 1. Mastering the production of balls from chromium-molybdenum steel. *Stal*. 2021. No. 11. pp. 36–39.
6. Nayzabekov A. B., Mukhametkaliyev B. S., Arbutz A. S., Lezhnev S. N. Reduction of consumption of steel grinding balls by improving their production technology. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernozemya*. 2016. No. 4 (46). pp. 78–86.
7. 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. No. 5. pp. 57–62.
8. Baranov N. A., Tulupov O. N. Production of grinding balls from rail steel. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya*. 2017. Vol. 1. pp. 96–99.
9. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T., Andrietti S., Barbelet M. An innovative method for producing balls from scrap rail heads. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 97, Iss. 1–4. pp. 893–901.
10. 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. Vol. 63, Iss. 1. pp. 5–12.
11. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T. A cross wedge rolling process for forming 70 mm diameter balls from heads of scrap railway rails. *Procedia Manufacturing 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, Faim 2017*. 2017. Vol. 11. pp. 466–473.
12. Camurri C., Carrasco C., Colàs R. Improving the working life of steel grinding balls by optimizing their hardness and tenacity. *Materials Science Forum*. 2014. Vol. 783. pp. 2260–2265.
13. Stalinskiy D. V., Rudyuk A. S., Solenyi V. K. Evaluation of the influence of grinding balls hardness on the wear and efficiency of grinding ferruginous quartzites. *Ekologiya i promyshlennost*. 2019. No. 1 (58). pp. 69–76.
14. Bai X., Jin Y. Heat treatment of wear resistant steel ball for large ball mill. *Heat Treatment of Metals*. 2017. Vol. 42, Iss. 5. pp. 193–196.
15. Stalinskiy D. V., Rudyuk A. S., Solenyi V. K. Choice of material and technologies for heat treatment of grinding balls operating mainly under abrasive wear conditions. *Stal*. 2017. No. 6. pp. 64–69.
16. Shevchenko O. I., Trekin G. E., Rubtsov V. Yu., Kurochkin V. V. Heat treatment of grinding balls in a new ball rolling mill. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*. 2019. Vol. 21. No. 3. pp. 110–117.
17. Efremento V. G., Popov E. S., Kuzmin S. O., Rufanova O. I., Efremento A. V. Implementation of the technology of three-stage thermal hardening of large-diameter grinding balls. *Metallurg*. 2013. No. 9. pp. 88–92.
18. Efremento V. G. Metallographic analysis of causes of destruction of rolled steel bodies for drum mills. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2000. No. 9. pp. 89–91.
19. Arlazarov A., Bouaziz O., Masse J. P., Kegel F. Characterization and modeling of mechanical behavior of quenching and partitioning steels. *Materials Science and Engineering: A*. 2015. Vol. 620. pp. 293–300.
20. Aysat S., Sadaddin A., Braday M. A., Yunus R. et al. Effect of heat treatment on hardness and wear of grinding balls. *Metallvedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 2017. No. 5 (743). pp. 34–38.
21. GOST 51685–2013. Railway rails. General specifications. Introduced: 01.07.2014.
22. GOST 7524–2015. Grinding steel balls for ball mills. Introduced: 01.11.2016.