

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 621.78.04:621.775.2

В. И. ЗУРНАДЖИ^{1*}, В. Г. ЕФРЕМЕНКО^{2*}, Е. В. ДУНАЕВ^{3*}, А. ЛЕКАТУ^{4*},
Р. А. КУССА^{5*}

^{1*}Каф. «Материаловедение и перспективные технологии», Приазовский государственный технический университет, ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87555, тел. +38 (0629) 44 65 20, эл. почта vladim.zurnadzy@gmail.com, ORCID 0000-0003-0290-257X

^{2*}Каф. «Физика», Приазовский государственный технический университет, ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87555, тел. +38 (0629) 44 61 31, эл. почта vgefremenko@gmail.com, ORCID 0000-0002-4537-6939

^{3*}ПАТ «МК «АЗОВСТАЛЬ», ул. Лепорского, 1, Мариуполь, Украина, 87500, тел. +38 (0629) 44 61 31, эл. почта eugeniy.dunaev@gmail.com, ORCID 0000-0002-6565-5564

^{4*}Каф. «Инженерное материаловедение», Университет Янины, Янина, Греция, 45110, эл. почта angelikilekatou@gmail.com, ORCID 0000-0001-7951-4431

^{5*}Каф. «Материаловедение и перспективные технологии», Приазовский государственный технический университет, ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87555, тел. +38 (0629) 44 65 20, эл. почта kussaroman1@gmail.com, ORCID 0000-0001-9003-2003

ПОВЫШЕНИЕ ОБЪЕМНОЙ ТВЕРДОСТИ СТАЛЬНЫХ МЕЛЮЩИХ ШАРОВ ПРИМЕНЕНИЕМ Q-n-P ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Цель. В данной работе необходимо исследовать возможность повышения качественных показателей стальных мелющих шаров диаметром 100 мм за счет применения Q-n-P термической обработки. **Методика.** В качестве материала использовали стальные мелющие шары диаметром 100 мм, полученные поперечно-винтовой прокаткой. Термическая обработка заключалась в закалочном охлаждении шаров в устройстве барабанного типа по различным режимам и последующем отпуске. Режимы закалки обеспечивали достижение среднемаховой температуры шаров в пределах 120–240 °С, что ниже мартенситной точки стали. После закалки шары сразу же подвергали отпуску при 170–300 °С в течение 2–10 ч. Обработанные шары подвергали визуальному осмотру, испытаниям на твердость и ударостойкость. Твердость измеряли методом Роквелла по шкале «С», микротвердость – на микротвердомере «Affti» при нагрузке 50 г. Ударостойкость шаров оценивали на копровой установке ударом падающего груза с энергией удара 6,8 кДж. Микроструктурный анализ выполняли с помощью оптического микроскопа «Axiovert 40-M». Количество остаточного аустенита определяли с помощью дифрактометра IV-Pro Rigaku в медном K α -излучении. **Результаты.** Показано, что в шарах диаметром 100 мм из хромомарганцевой стали в результате термической обработки по стандартному режиму возникают поверхностные трещины. Применение термообработки по Q-n-P-принципу позволяет достичь высокой твердости по всему сечению (в пределах 54–57 HRC) при отсутствии в шарах закалочных трещин. Обработанные по такой технологии шары имеют высокую ударостойкость при повторных ударах с энергией 6,8 кДж. **Научная новизна.** Авторами впервые исследована целесообразность использования Q-n-P-принципа в технологии термической обработки стальных мелющих шаров большого диаметра из стали повышенной прокаливаемости. Установлено, что Q-n-P-обработка позволяет существенно (на 10 HRC) повысить объемную твердость в шарах диаметром 100 мм, сохранив их высокую ударостойкость при испытаниях падающим грузом. Получение таких свойств обеспечивается снятием закалочных напряжений и формированием двухфазной мартенсито-аустенитной структуры с повышенным количеством (25–30 %) остаточного аустенита. Последнее становится возможным благодаря процессу перераспределения углерода из мартенсита в аустенит с обогащением последнего до 1,12 % С. **Практическая значимость.** Показана целесообразность применения Q-n-P-термической обработки при производстве стальных мелющих шаров высокой объемной твердости.

Ключевые слова: Q-n-P-обработка; мелющие шары; твердость; ударостойкость; микроструктура

Введение

Мелющие шары активно используются в горно-металлургической, цементной, энергетической и других перерабатывающих отраслях промышленности. Шары выполняют работу по измельчению сырья (руды, клинкера, угля и т. д.) в барабанных мельницах, подвергаясь в процессе эксплуатации интенсивному изнашиванию [4, 5]. Удельный расход крупных шаров (диаметром 100–120 мм) на горно-обогатительных комбинатах Украины достигает нескольких килограммов на тонну концентрата, что отрицательно отражается на экономических показателях процесса переработки [10]. Высокий расход шаров связан с их пониженной объемной твердостью. Как правило, глубина упрочненного (закаленного) слоя в шарах диаметром 100 и 120 мм 3-й группы из рельсовых марок стали не превышает 10 мм [15, 16]; объемная твердость шаров составляет 45–47 HRC. С целью снижения удельного расхода крупных шаров необходимо повысить их объемную твердость, что требует освоения производства шаров из стали с повышенным уровнем легирования.

При производстве стальных катаных шаров их подвергают термоупрочнению с прокатного нагрева по схеме прерванной закалки в воде с самоотпуском [7, 9]. Закалку крупных шаров прекращают при достижении среднemasсовой температуры ($T_{с/м}$) в пределах 220–250 °С. При этой температуре шары проходят самоотпуск, медленно остывая в накопительных бункерах [6]; это обеспечивает получение в них поверхностной твердости не ниже 50 HRC. При изготовлении шаров большого диаметра из стали повышенной прокаливаемости термообработка по такой технологии приводит к возникновению в них трещин вследствие неблагоприятного распределения напряжений в объеме изделия. Проблема растрескивания является одной из главных при производстве стальных шаров диаметром 80–120 мм со сквозной закалкой на мартенсит [3, 11].

Технология термической обработки Q-n-P (Quenching and Partitioning) позволяет повысить комплекс механических свойств низколегированных сталей за счет увеличения количества остаточного аустенита ($A_{ост}$) в структуре [12, 13, 17, 18]. Принцип Q-n-P предусматривает приостановку закалочного охлаждения в интервале между точками M_n и M_k и последую-

щий нагрев для перераспределения углерода из мартенсита в аустенит. Такая последовательность операций вписывается в схему термоупрочнения мелющих шаров и может оказать положительное влияние на напряженное состояние шаров, предотвращая появление трещин. Удачный опыт применения Q-n-P-обработки применительно к литым шарам диаметром 80 мм из высокохромистого чугуна описан в работе [14]. В то же время, использование Q-n-P-принципа в практике термообработки стальных мелющих шаров до настоящего времени оставалось неизвестным, что предопределило выполнение данной работы.

Цель

Целью данной работы является обновление повышения объемной твердости катаных мелющих шаров диаметром 100 мм с помощью применения термической обработки по Q-n-P-принципу.

Методика

В качестве материала были использованы катаные шары номинальным диаметром 100 мм, изготовленные из хромомарганцевой стали, содержащей 0,7–0,8 % С. Шары были прокатаны на стане поперечно-винтовой прокатки и после прокатки охлаждены водой (20–22 °С) в устройстве барабанного типа [6] по различным режимам (табл. 1). Режимы отличались длительностью охлаждения, что позволяло изменять $T_{с/м}$ шаров на выходе из закалочного устройства. Режим № 1 соответствовал полному охлаждению шаров в воде, режимы № 2–4 обеспечивали достижение среднemasсовой температуры в интервале M_n – M_k , а режим № 5 – на уровне M_n (составляет 227 °С для использованной стали). Под среднemasсовой температурой принимали температуру поверхности закаленного шара, определенную после завершения перераспределения тепла в объеме шара (через 1–1,5 мин после его извлечения из воды). $T_{с/м}$ измеряли оптическим пирометром.

После закалки шары в течение не более 10 мин горячими переносили в шахтную электрическую печь, где отпускали при 170–300 °С от 2 до 10 ч (определенную часть закаленных шаров охлаждали после закалки на спокойном воздухе без отпуска). Таким образом, режимы

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

№ 2–4 соответствовали Q-n-P-принципу, а режим № 5 имитировал стандартную технологию термоупрочнения шаров.

Наличие трещин на поверхности шаров определяли визуально. Микроструктуру и распределение твердости по сечению исследовали на темплетах, вырезанных из шаров анодно-механической резкой и шлифованных для удаления влияния анодного реза. Твердость определяли методом Роквелла по шкале «С», микротвердость – на микротвердомере «Affri» при нагрузке 50 г. Ударостойкость шаров оценивали на копровой установке ударом падающего с высоты 5,5 м груза массой 125 кг (энергия удара 6,8 кДж); нормативное количество ударов – 8. Микроструктурный анализ выполняли с применением оптического микроскопа «Axiovert 40-M». Количество остаточного аустенита определяли рентгеноструктурным методом с помощью дифрактометра IV-Pro Rigaku в медном K_{α} -излучении.

Результаты

При использовании стандартного режима термоупрочнения (с $T_{с/м} = 220–240$ °С) в шарах

диаметром 100 мм из стали повышенной прокаливаемости возникают поверхностные трещины. Причиной является то, что к моменту прерывания закалки мартенситное превращение протекает лишь в поверхностных слоях на глубину до 15 мм; во внутренних слоях шара еще сохраняется аустенитная структура [8]. При последующем самоотпуске этот аустенит превращается либо в бейнит, либо в мартенсит. В последнем случае превращение аустенита происходит на завершающей стадии самоотпуска или после его завершения, когда еще не остывшие шары перегружают из бункеров в вагоны. Возникающий в центре мартенсит деформирует поверхностный слой шара, вызывая в нем высокие растягивающие напряжения. Разрядка этих напряжений не происходит, поскольку к этому моменту в шаре существенно снижается температура. Напряжения вызывают появление поверхностных трещин; они возникают либо сразу после полного остывания шара, либо через некоторое время (инкубационный период трещинообразования может растягиваться на несколько недель).

Таблица 1

Влияние режима термообработки на склонность шаров к растрескиванию

Table 1

Influence of heat treatment mode on the tendency of balls to crack

Номер режима	Среднемассовая температура, °С	Наличие трещин (охлаждение на воздухе)	Температура отпуска ($T_{отп}$), °С	Твердость*/наличие трещин после отпуска
1	20	есть	–	61/есть
2	110–120	есть	170	58/есть
			200	57/нет
			250	55/нет
			300	52,5/нет
3	125–135	нет	200	57,5/нет
			250	55,5/нет
4	150–170	нет	200	57,5/нет
			250	54,5/нет
5	220–240	есть	250	55/есть

*средняя твердость поверхности после отпуска в течение 10 ч.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Таким образом, существует две возможности предотвращения трещин в шарах со сквозной закалкой. Первая – обеспечить протекание самоотпуска шара таким образом, чтобы аустенит центральных слоев максимально полно превратился в нижний бейнит до того, как общая температура шара достигнет точки начала мартенситного превращения (точка M_n). Это требует создания в бункере условий, близких к изотермическим, и очень длительных выдержек, что невозможно обеспечить в условиях производства.

Вторым направлением является снижение количества аустенита в центре шара за счет увеличения длительности закалки. В этом случае формирование мартенсита в центре шара произойдет на стадии закалки, приводя к возникновению растягивающих напряжений на поверхности. Чтобы растрескивание шаров не происходило сразу после закалки, следует регулировать соотношение объемов «аустенит/мартенсит» в центральных слоях, т. е. сохранять определенную долю непревращенного аустенита в момент прерывания охлаждения. Учитывая различия в удельном объеме аустенита и мартенсита, можно снизить уровень растягивающих напряжений на поверхности шара и предотвратить быстрое появление трещин. Для релаксации возникших напряжений и полного подавления трещинообразования шары после закалки должны подвергаться отдельной операции отпуска. Указанная технология, по сути, является Q-n-P-обработкой, поскольку температура во всех слоях шара должна снизиться ниже мартенситной точки стали; это обеспечит начало мартенситного превращения в центральных слоях шара.

При реализации экспериментальных режимов термообработки было установлено, что шары, полностью охлажденные в воде ($T_{с/м}=20\text{ °C}$, режим № 1), растрескивались в течение 2–5 мин после завершения закалки; их не удалось перенести в печь для отпуска до появления трещин (показаны стрелками на рис. 1).

В случае $T_{с/м}=110\text{--}120\text{ °C}$, шары в процессе доохлаждения на воздухе без отпуска растрескивались при снижении их температуры менее $65\text{--}70\text{ °C}$. Отпуск при 170 °C несколько снизил уровень напряжений, но не предотвратил образования трещин: шары, отпущенные в течение 2–4 ч, растрескались через 24 ч, отпущенные

в течение 10 ч – через 48 ч после завершения отпуска. Увеличение температуры отпуска до $200\text{--}300\text{ °C}$ полностью предотвратило растрескивание даже при минимальной продолжительности отпуска; трещины не появились на таких шарах даже спустя месяц после завершения отпуска.



Рис. 1. Трещины на поверхности шаров, обработанных по режиму № 1

Fig. 1. Cracks on the surface of balls, treated according to mode No. 1

В случае реализации режимов № 3 и 4 трещины не появлялись в шарах ни при охлаждении на воздухе (без отпуска), ни после отпуска при $200\text{--}250\text{ °C}$. Повышение среднетемпературной температуры шаров до $220\text{--}240\text{ °C}$ (режим № 5) резко изменило картину и привело к растрескиванию как при доохлаждении на воздухе, так и после отпуска при 250 °C .

Твердость на поверхности отпущенных шаров составила $57\text{--}57,5\text{ HRC}$ (200 °C), $54,5\text{--}55,5\text{ HRC}$ (250 °C), $52,5\text{ HRC}$ (300 °C).

Все шары режимов № 2–4, отпущенные при $200\text{--}300\text{ °C}$, выдержали испытания на ударостойкость при 8 ударах; некоторые шары были успешно испытаны при количестве ударов в 2–3 раза выше нормы. Расколов и появления трещин на поверхности шаров зафиксировано не было. Шар режима № 2 (отпуск при 170 °C , 10 ч) с поверхностной трещиной разрушился на седьмом ударе. Шары, обработанные по режимам № 1 и 5 и имевшие поверхностные трещины, разрушались на втором–четвертом ударе.

При исследовании распределения твердости по сечению шаров было установлено, что, независимо от режима термообработки, все шары имеют сквозную закалку: максимальный пере-

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

пад между приповерхностным слоем и центром составил 1,5 HRC (отпуск при 200–250 °С) и 4 HRC (отпуск при 300 °С) (табл. 2). Общий уровень твердости и, соответственно, объемная

твердость снижаются по мере роста температуры отпуска с 56,9 HRC (170 °С) до 49,6 HRC (300 °С).

Таблица 2

Распределение твердости по сечению и объемная твердость (HRC) термообработанных шаров (длительность отпуска – 10 ч)

Table 2

Distribution of hardness by cross-section and volume hardness (HRC) of heat-treated balls (tempering duration is 10 h)

$T_{с/м}, ^\circ\text{C}$	$T_{отп.}, ^\circ\text{C}$	Расстояние от поверхности, мм									$H_{об}$
		5	10	15	20	25	30	35	40	50	
110–120	без отп.	62	62	61	61,5	60	60	59,5	59,5	60	61,0
	170	57,5	56,5	57	56,5	56	57	57	56,5	56	56,9
	200	57	56,5	56,5	56	56	55,5	55	57	55,5	56,4
	250	55,5	55,5	55	54,5	53,5	54	54,5	54,5	54	54,9
	300	52	50	49	48	48	47	48	47	47	49,6
125–135	без отп.	61,5	62	61,5	62	61	61	62	61	61	61,6
	200	57	56	57	57	56	56,5	56,5	57	56,5	56,7
	250	54	54	53,5	54	53,5	54	54	53,5	53	54,0
150–175	без отп.	59,5	59,5	61	60	59	59,5	60	59	60	59,8
	200	56	56	56,5	57	56	55,5	56,5	56	56	56,2
	250	54,5	54,5	55	55	54,5	55	54	55	54,5	54,7
220–240	250	54	55	54,5	54	53,5	54	53,5	53	52,5	54,2

При изучении микроструктуры термообработанных по режимам № 2–4 шаров было установлено, что в большей части объема (на глубине свыше 10 мм от поверхности) она имеет гетерогенное строение, состоящее из чередующихся темных и светлых зон (рис. 2, а). Темные зоны имеют структуру отпущенного мартенсита, который, благодаря сильной травимости, имеет однородное строение с плохо различной игольчатостью. В светлых участках наблюдается игольчатая структура, хорошо различимая на белом фоне аустенита (рис. 2, б, показано стрелкой).

Помимо темных/светлых зон в структуре наблюдаются отдельные черные участки троостита (показаны на рис. 2, б двойной стрелкой). Поверхностные слои шаров (на глубину до 10 мм) имеют однородное строение отпущенного игольчатого мартенсита; остаточный

аустенит выявляется лишь в виде отдельных разрозненных островков (показаны на рис. 2, в стрелками).

Присутствие различного количества остаточного аустенита в разных слоях шара, выявленное визуально при микроструктурном исследовании [1], было подтверждено с помощью рентгеноструктурного метода. Анализ дифрактограмм образцов шара, обработанного по режиму № 3 ($T_{отп.} = 200^\circ\text{C}$), показал, что объемная доля $A_{ост}$ составляет: на глубине 5 мм – 7,8 %, на глубине 0,5 радиуса – 24,9 %, в центре – 30,3 %.

Представленные результаты показали, что режимы № 2–4 (за исключением отпуска при 170 °С) обеспечили достижение одинаково высокой твердости по всему сечению шаров при отсутствии закалочных трещин. Объемная твердость при этом возросла до 54–56,7 HRC ($T_{отп.} = 200\text{--}250^\circ\text{C}$), т. е. почти на 10 HRC по

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

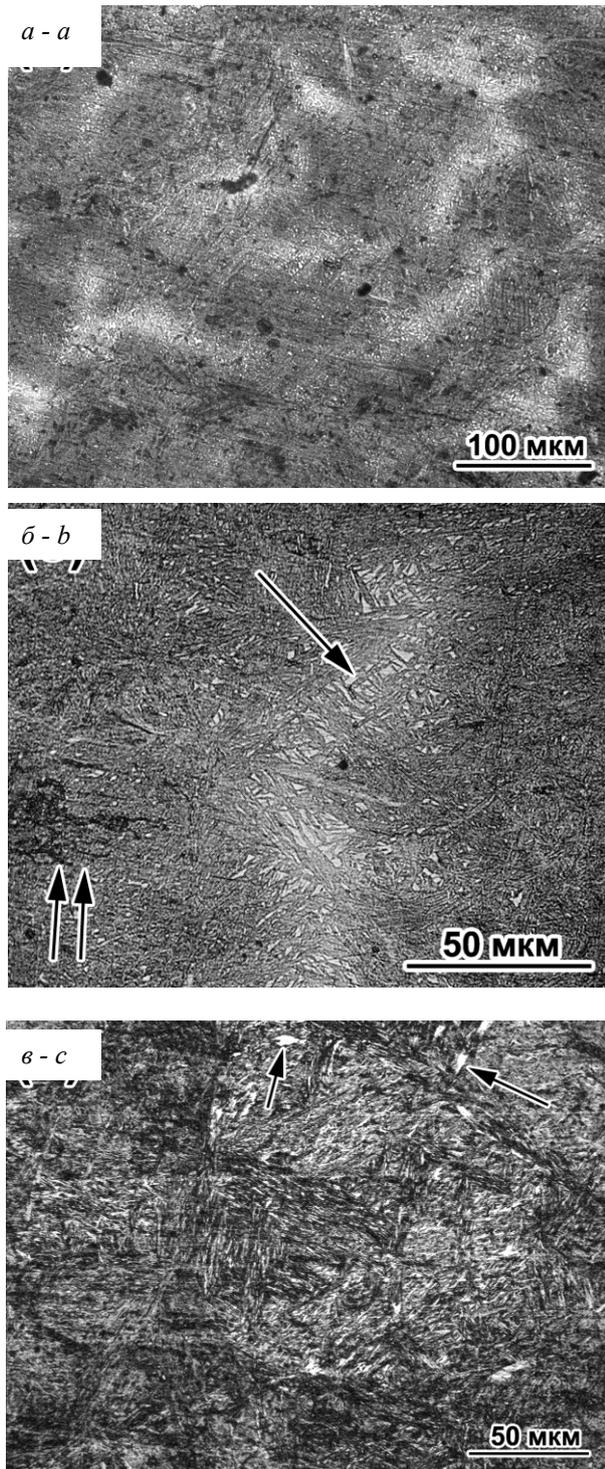


Рис. 2. Микроструктура шара, обробленого по режиму № 3 (отпуск при 200 °С): *a, б* – центр, *в* – на глибині 5 мм від поверхні

Fig. 2. Microstructure of the ball, treated according to mode No. 3 (tempering at 200 °C): *a, b* – center, *c* – at a depth of 5 mm from the surface

сравнению со стандартными шарами. Шары имели высокую ударостойкость, что важно с учетом эксплуатации шаров в большегрузных мельницах. Полученные результаты можно объяснить достижением оптимального распределения микроструктуры по сечению шаров в момент прерывания закалки с наличием преимущественно мартенситной структуры в поверхностных слоях и аустенито-мартенситной структуры в центральных объемах. В итоге возникло сбалансированное напряженное состояние, характеризующееся либо отсутствием растягивающих напряжений на поверхности, либо их низким уровнем, не приводящим к возникновению трещин. Поэтому при $T_{с/м}=120-170$ °С шары не растрескивались не только после отпуска, но и при охлаждении на воздухе, т. е. без отпуска.

Можно предположить, что на стадии отпуска определенная часть аустенита в центральных слоях шаров превратилась в бейнит. Кроме того, при отпуске происходило перераспределение углерода из мартенсита в аустенит (т. наз. «стадия partitioning»), в результате чего содержание углерода в остаточном аустените в центре шара максимально повысилось до 1,12 % (содержание углерода рассчитано дифрактограммами по известной методике [18]). Обогащение углеродом стабилизировало аустенит к бейнитному превращению, в результате чего по завершении отпуска он частично превратился в мартенсит, сохранившись в структуре в значительном количестве (25–30 %). Это сформировало «светлые» участки структуры, показанные на рис. 1. Поскольку аустенит имеет существенно меньший удельный объем по сравнению с мартенситом, то рост доли $A_{ост}$ в центральных слоях дополнительно снизил уровень растягивающих напряжений на поверхности, предотвратив появление трещин [2]. В поверхностных слоях $A_{ост}$ гораздо меньше, т. к. в них в процессе закалки температура снизилась до минимальных (для шара) значений, поэтому здесь большая часть аустенита превратилась в мартенсит.

Таким образом, использование принципа Q-n-P в технологии термоупрочнения мелющих шаров позволяет решить задачу повышения объемной твердости крупных шаров при сохранении их высокой ударостойкости и отсутствии закалочных трещин.

Научная новизна и практическая значимость

Впервые исследована возможность применения термической обработки, основанной на Q-n-P-принципе, в производстве стальных мелющих шаров повышенной объемной твердости. Показано, что в случае регулируемого закалочного охлаждения с достижением средне-массовой температуры в пределах 120–170 °С и последующего отпуска при 200–250 °С в шарах диаметром 100 мм достигается сквозная твердость в пределах 54–57 HRC при высокой ударостойкости и отсутствии закалочных трещин. Установлено, что такая обработка формирует микроструктуру, уравнивающую закалочные напряжения в объеме шара и обладающую повышенной ударостойкостью благодаря наличию 25–30 % остаточного аустенита. Увеличение количества остаточного аустенита происходит благодаря его обогащению углеродом в процессе перераспределения углерода между мартенситом и аустенитом при отпуске.

Выводы

1. Термическое упрочнение катаных мелющих шаров диаметром 100 мм из стали повышенной прокаливаемости по стандартной тех-

нологии ($T_{с/м}=220–240$ °С) приводит к появлению поверхностных трещин сразу после завершения самоотпуска.

2. Использование принципа Q-n-P с удлинением закалки, обеспечивающим средне-массовую температуру шаров в пределах 120–170 °С, с последующим отпуском при 200–250 °С и выдержкой не менее 1 ч, позволяет достичь твердости в пределах 54–57 HRC по всему сечению при отсутствии закалочных трещин. Обработанные по такой технологии шары имеют высокую ударостойкость при повторных ударах с энергией 6,8 кДж.

3. В результате Q-n-P-обработки в шаре формируется гетерогенная микроструктура, состоящая из участков отпущенного мартенсита и аустенито-мартенситных участков пониженной травимости. Перераспределение углерода между мартенситом и аустенитом при отпуске привело к увеличению доли остаточного аустенита до 25–30 % при концентрации углерода в $A_{ост}$ 1,12 %.

Благодарность

Работа выполнена в рамках проекта (№ 0117U002270), финансируемого Министерством образования и науки Украины.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вакуленко, И. А. Морфология структуры и деформационное упрочнение стали / И. А. Вакуленко, В. И. Большаков. – Днепропетровск : Маковецкий, 2008. – 196 с.
2. Вакуленко, И. А. Структура и свойства углеродистой стали при знакопеременном деформировании / И. А. Вакуленко. – Днепропетровск : Gaudeamus, 2003. – 94 с.
3. Гуляева, Т. П. Качество мелющих шаров из легированных марок стали / Т. П. Гуляева, Т. П. Седоволовая, А. П. Данилов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1995. – № 6. – С. 75.
4. Диагностика процессов износа материалов в шаровых барабанных мельницах / Е. М. Прохоренко, В. Ф. Клепиков, В. В. Литвиненко, П. А. Хаймович, Н. А. Шульгин, А. И. Морозов // Вост.-Европ. журнал передовых технологий. – 2015. – № 1/5(73). – С. 14–20.
5. Заец, В. Н. Оценка условий работы помольных шаров из стали эвтектоидного состава при использовании в шаровых мельницах / В. Н. Заец // Вісн. Харк. нац. техн. ун-ту сільського госп-ва ім. Петра Василенка. – Харків, 2015. – Вип. 158. – С. 288–293.
6. Зеликович, А. Я. Улучшение качества термически обработанных мелющих шаров / А. Я. Зеликович, А. М. Токмаков // Сталь. – 1994. – № 2. – С. 64–65.
7. Зенкин, И. В. Исследование деформированного состояния при объемной штамповке мелющих тел / И. В. Зенкин, Е. А. Наумова, В. В. Драгобецкий // Вісн. Кременчуц. нац. ун-ту ім. М. Остроградського. – 2016. – Вип. 1 (96). – С. 97–102.
8. Кинетика превращения аустенита в рельсовых сталях М74 и 75ХГСМ при непрерывном охлаждении / Ф. К. Ткаченко, С. О. Кузьмин, В. Г. Ефременко, В. Г. Казанков // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2009. – Вип. 29. – С. 198–201.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

9. Снижения расхода стальных мелющих шаров путем улучшения технологии их производства / А. Б. Найзабеков, Б. С. Мухаметкалиев, А. С. Арбуз, С. Н. Лежнев // Вести высш. учеб. завед. Черноземья. – 2016. – № 4 (46). – С. 78–86.
10. Эффективность использования мелющих шаров повышенного качества в условиях ОАО «Центральный ГОК» / В. Г. Ефременко, А. Б. Ртищев, Ю. А. Зинченко, Ф. К. Ткаченко, И. В. Ганошенко, О. И. Труфанова, С. О. Кузьмин // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2009. – № 1. – С. 90–93.
11. Camurri, C. Improving the working life of steel grinding balls by optimizing their hardness and tenacity / C. Camurri, C. Carrasco, R. Colàs // *Materials Science Forum*. – 2014. – Vol. 783–786. – P. 2260–2265. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.783-786.2239.
12. Characterization and modeling of mechanical behavior of quenching and partitioning steels / A. Arlazarov, O. Bouaziz, J. P. Masse, F. Kegel // *Materials Science and Engineering: A*. – 2015. – Vol. 620. – P. 293–300. doi: 10.1016/j.msea.2014.10.034.
13. Enhanced stability of retained austenite and consequent work hardening rate through pre-quenching prior to quenching and partitioning in a Q–P microalloyed steel / Jun Zhang, Hua Ding, R. D. K. Misra, C. Wang // *Materials Science and Engineering: A*. – 2014. – Vol. 611. – P. 252–256. doi: 10.1016/j.msea.2014.05.074.
14. High Wear Resistance of White Cast Iron Treated by Novel Process: Principle and Mechanism / X. Jia, X. Zuo, Y. Liu, N. Chen, Y. Rong // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2015. – Vol. 46. – Iss. 12. – P. 5514–5525. doi: 10.1007/s11661-015-3137-4.
15. Improving the hardness of ОАО Azovstal Metallurgical Combine steel balls for crushing mills / V. G. Efremenko, I. V. Ganoshenko, F. K. Tkachenko, V. A. Zhurba, O. I. Trufanova // *Steel in Translation*. – 2008. – Vol. 38. – Iss. 2. – P. 176–178. doi: 10.3103/S0967091208020186.
16. Introduction of Three-Stage Thermal Hardening Technology for Large Diameter Grinding Balls / V. G. Efremenko, E. S. Popov, S. O. Kuz'min, O. I. Trufanova, A. V. Efremenko // *Metallurgist*. – 2014. – Vol. 57. – Iss. 9–10. – P. 849–854. doi: 10.1007/s11015-014-9812-7.
17. Liu, S. G. Application of quenching–partitioning–tempering process and modification to a newly designed ultrahigh steel / S. G. Liu, S. S. Dong, F. Yang // *Materials & Design (1980–2015)*. – 2014. – Vol. 56. – P. 37–43. doi: 10.1016/j.matdes.2013.10.094.
18. Sun, J. Microstructure development and mechanical properties of quenching and partitioning (Q&P) steel and an incorporation of hot-dipping galvanization during Q&P process / Sun Jing, Yu Hao // *Materials Science and Engineering: A*. – 2013. – Vol. 586. – P. 100–107. doi: 10.1016/j.msea.2013.08.021.

В. І. ЗУРНАДЖИ^{1*}, В. Г. ЄФРЕМЕНКО^{2*}, Є. В. ДУНАЄВ^{3*}, А. ЛЕКАТУ^{4*}, Р. О. КУССА^{1*}

^{1*}Каф. «Матеріалознавство та перспективні технології», Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87555, тел. +38 (0629) 44 65 20, ел. пошта vadim.zurnadzhy@gmail.com, ORCID 0000-0003-0290-257X

^{2*}Каф. «Фізика», Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87555, тел. +38 (0629) 44 61 31, ел. пошта vgefremenko@gmail.com, ORCID 0000-0002-4537-6939

^{3*}ПАТ «МК «АЗОВСТАЛЬ», вул. Лепорського, 2, Маріуполь, Україна, 87500, тел. +38 (0629) 44 61 31, ел. пошта eugeniy.dunaev@gmail.com, ORCID 0000-0002-6565-5564

^{4*}Каф. «Інженерне матеріалознавство», Університет Яніни, Яніна, Греція, 45110, ел. пошта angelikilekatou@gmail.com, ORCID 0000-0001-7951-4431

^{5*}Каф. «Матеріалознавство та перспективні технології», Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87555, тел. +38 (0629) 44 65 20, ел. пошта kussaroman1@gmail.com, ORCID 0000-0001-9003-2003

ПІДВИЩЕННЯ ОБ'ЄМНОЇ ТВЕРДОСТІ СТАЛЕВИХ МОЛОЛЬНИХ КУЛЬ ВИКОРИСТАННЯМ Q-n-P ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

Мета. В даній роботі досліджена можливість підвищення якісних показників сталевих молольних куль діаметром 100 мм за рахунок застосування Q-n-P термічної обробки. **Методика.** Як матеріал використовували сталеві молольні кулі діаметром 100 мм, отримані поперечно-гвинтовою прокаткою. Термічна обробка полягала в гартувальному охолодженні куль в пристрої барабанного типу за різними режимами й подальшому відпуску. Режими загартування забезпечували досягнення середньомасової температури куль в межах 120–240 °С, що нижче мартенситної точки сталі. Після гартування кулі відразу ж відпускали при 170–300 °С протягом 2–10 год. Оброблені кулі піддавали візуальному огляду, випробуванням на твердість та ударостій-

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

кість. Твердість вимірювали методом Роквелла за шкалою «С», мікротвердість – на мікротвердомірі «Affri» при навантаженні 50 м. Ударостійкість куль оцінювали на копровій установці ударом падаючого вантажу з енергією удару 6,8 кДж. Мікроструктурний аналіз виконували за допомогою оптичного мікроскопа «Axiovert 40-M». Кількість залишкового аустеніту визначали за допомогою дифрактометра IV-Pro Rigaku в мідному K_{α} -випромінюванні. **Результати.** Показано, що в кулях діаметром 100 мм із хромомарганцевої сталі в результаті термічної обробки за стандартним режимом виникають поверхневі тріщини. Застосування термообробки згідно Q-n-P-принципу дозволяє досягти високої твердості по всьому перетину (в межах 54–57 HRC) при відсутності в кулях гартівних тріщин. Оброблені за такою технологією кулі мають високу ударостійкість при повторних ударах із енергією 6,8 кДж. **Наукова новизна.** Авторами вперше досліджена доцільність використання Q-n-P-принципу в технології термічної обробки сталевих молоткових куль великого діаметра зі сталі підвищеної прогартуваності. Встановлено, що Q-n-P-обробка дозволяє істотно (на 10 HRC) підвищити об'ємну твердість у кулях діаметром 100 мм, зберігши їх високу ударостійкість при випробуваннях падаючим вантажем. Отримання таких властивостей забезпечується зняттям гартівних напруг і формуванням двофазної мартенсито-аустенітної структури з підвищеною кількістю (25–30 %) залишкового аустеніту. Останнє стає можливим завдяки процесу перерозподілу вуглецю з мартенситу в аустеніт із збагаченням останнього до 1,12 % С. **Практична значимість.** Показана доцільність застосування Q-n-P-термічної обробки при виробництві сталевих молоткових куль високої об'ємної твердості.

Ключові слова: Q-n-P-обробка; молоткові кулі; твердість; ударостійкість; мікроструктура

V. I. ZURNADZHY^{1*}, V. G. EFREMENKO^{2*}, E. V. DUNAEV^{3*}, A. LEKATOU^{4*},
R. A. KUSSA^{5*}

^{1*}Dep. «Materials Science and Advanced Technologies», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87555, tel. +38 (0629) 44 61 31, e-mail vadim.zurnadzhy@gmail.com, ORCID 0000-0003-0290-257X

^{2*}Dep. «Physics», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87555, tel. +38 (0629) 44 61 31, e-mail vgefremenko@gmail.com, ORCID 0000-0002-4537-6939

^{3*}PJSC «Azovstal Iron & Steel Works», Leporskyi St., 1, Mariupol, Ukraine, 87500, tel.+38 (0629) 44 65 20, ORCID 0000-0002-6565-5564

^{4*}Dep. «Materials Science & Engineering», University of Ioannina, Ioannina, Greece, 45110, e-mail angelikilekatou@gmail.com, ORCID 0000-0001-7951-4431

^{5*}Dep. «Materials Science and Advanced Technologies», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87555, tel. +38 (0629) 44 61 31, e-mail kussaroman1@gmail.com, ORCID 0000-0003-0290-257X

INCREASING VOLUME HARDNESS OF STEEL GRINDING BALLS USING Q-n-P HEAT TREATMENT

Purpose. This study investigates the possibility of improving the quality of grinding steel balls with a diameter of 100 mm by using Q-n-P heat treatment. **Methodology.** Steel grinding balls with a diameter of 100 mm, obtained by transverse screw rolling, were used as a material. The heat treatment consisted of balls quenching in a drum-type device according to various modes and subsequent tempering. The quenching modes provided the bulk temperature of the balls in the range of 120–240 °C, which is lower than the martensitic point M_s of the steel. After quenching, the balls were immediately tempered at 170–300 °C for 2–10 hours. The treated balls were visually examined, tested for hardness and impact resistance. The hardness was measured according to the Rockwell method by scale "C", the microhardness was measured with microhardness tester "Affri" at a load of 50 g. The impact resistance of the balls was evaluated by impact of a dropped load with impact energy of 6.8 kJ. Microstructural analysis was conducted using an optical microscope "Axiovert 40-M". The amount of residual austenite was determined using an "IV-Pro Rigaku" diffractometer in copper K_{α} -radiation. **Findings.** It is shown that, as a result of treatment of 100 mm diameter balls of chromium-manganese steel according the standard mode, the cracks occur on balls surface. Using Q-n-P heat treatment allows achieving higher hardness through the cross section (within 54–57 HRC) while quenching cracks are absent on the balls. The Q-n-P-treated balls have high impact resistance under repeated impacts with energy of 6.8 kJ. **Originality.** For the first time the authors investigated the feasibility of using the Q-n-P heat treatment for steel grinding balls of large diameter made of steel with increased hardenability. It has been determined that Q-n-P-processing allows to significantly increase (by 10 HRC) the bulk hardness of 100 mm diameter balls, while retaining their high impact resistance in tests with a dropped load. The obtaining of such properties is provided by the relaxation of quenching stresses and the formation of a two-phase martensitic-austenite structure with

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

an increased amount (25-30 %) of retained austenite. The latter becomes possible due to the process of partitioning carbon from martensite to austenite with enrichment of the latter to 1.12 % C. **Practical value.** The advisability of Q-n-P-heat treatment in the production of steel grinding balls with higher bulk hardness is shown.

Keywords: Q-n-P-treatment; grinding balls; hardness; impact resistance; microstructure

REFERENCES

1. Vakulenko, I. A., & Bolshakov, V. I. (2008). *Morfologiya struktury i deformatsionnoe uprochnenie stali*. Dnepropetrovsk: Makovetskiy Y. V. Publisher. (in Russian)
2. Vakulenko, I. A. (2003). *Struktura i svoystva uglerodisty stali pri znakoperemennom deformirovanii*. Dnepropetrovsk: Gaudeamus. (in Russian)
3. Gulyaeva, T. P., Sedovolosaya, T. P., & Danilov, A. P. (1995) Kachestvo melyushchikh sharov iz legirovannykh marok stali. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya*, 6, 75. (in Russian)
4. Prokhorenko, Y. M., Klepikov, V. F., Litvinenko, V. V., Khaymovich, P. A., Shulgin, N. A., & Morozov, A. I. (2015). Diagnostika protsessov iznosa materialov v sharovykh barabannykh melnitsakh. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1, 5(73), 14-20. (in Russian)
5. Zaets, V. N. (2015). Otsenka usloviy raboty pomolnykh sharov iz stali evtektoidnogo sostava pri ispolzovanii v sharovykh melnitsakh. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva im. Petra Vasylenka*, 158, 288-293. (in Russian)
6. Zenkin, I. V., Naumova, E. A., & Dragobetskiy, V. V. (2016). The investigation of the deformed state during the volume stamping of grinding bodies. *Scientific journal «Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University»*, 1(96), 97-102. (in Russian)
7. Zelikovich, A. Y., & Tokmakov, A. M. (1994). Uluchshenie kachestva termicheski obrabotannykh melyushchikh sharov. *Stal*, 2, 64-65. (in Russian)
8. Tkachenko, F. K., Kuzmin, S. O., Efremenko, V. G., & Kazankov, V. H. (2009). Kinetika prevrashcheniya austenita v relsovykh stalyakh M74 i 75KhGSM pri nepreryvnom okhlazhdenii. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu im. akademika V. Lazariana*, 29, 198-201. (in Russian)
9. Nayzabekov, A. B., Mukhametkaliev, B. S., Arbus, A. S., & Lezhnev, S. N. (2016). Snizheniya raskhoda stalnykh melyushchikh sharov putem uluchsheniya tekhnologii ikh proizvodstva. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernozemya*, 4(46), 78–86. (in Russian)
10. Efremenko, V. G., Rtishchev, A. B., Zinchenko, Y. A., Tkachenko, F. K., Ganoshenko, I. V., Trufanova, O. I., & Kuzmin, S. O. (2009). Effektivnost ispolzovaniya melyushchikh sharov povyshennogo kachestva v usloviyakh OAO «Tsentralnyy GOK». *Metallurgical and Mining Industry*, 1, 90-93. (in Russian)
11. Camurri, C., Carrasco, C., & Colàs, R. (2014). Improving the working life of steel grinding balls by optimizing their hardness and tenacity. *Materials Science Forum*, 783, 2260-2265. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.783-786.2260. (in English)
12. Arlazarov, A., Bouaziz, O., Masse, J. P., & Kegel, F. (2015). Characterization and modeling of mechanical behavior of quenching and partitioning steels. *Materials Science and Engineering*, 620, 293-300. doi: 10.1016/j.msea.2014.10.034. (in English)
13. Zhang, J., Ding, H., Misra, R. D. K., & Wang, C. (2014). Enhanced stability of retained austenite and consequent work hardening rate through pre-quenching prior to quenching and partitioning in a Q–P microalloyed steel. *Materials Science and Engineering*, 611, 252-256. doi: 10.1016/j.msea.2014.05.074. (in English)
14. Jia, X., Zuo, X., Liu, Y., Chen, N., & Rong, Y. (2015). High Wear Resistance of White Cast Iron Treated by Novel Process: Principle and Mechanism. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 46(12), 5514-5525. doi: 10.1007/s11661-015-3137-4. (in English)
15. Efremenko, V. G., Ganoshenko, I. V., Tkachenko, F. K., Zhurba, V. A., & Trufanova, O. I. (2008). Improving the hardness of Azovstal Metallurgical Combine steel balls for crushing mills. *Steel in Translation*, 38(2), 176-178. doi:10.3103/S0967091208020186. (in English)
16. Efremenko, V. G., Popov, E. S., Kuz'min, S. O., Trufanova, O. I., & Efremenko, A. V. (2014). Introduction of Three-Stage Thermal Hardening Technology for Large Diameter Grinding Balls. *Metallurgist*, 57(9-10), 849-854. doi:10.1007/s11015-014-9812-7. (in English)
17. Liu, S. G., Dong, S. S., Yang, F., Li, L., Hu, B., Xiao, F. H., ... Liu, H. S. (2014). Application of quenching–partitioning–tempering process and modification to a newly designed ultrahigh carbon steel. *Materials & Design*, 56, 37-43. doi: 10.1016/j.matdes.2013.10.094. (in English)

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

18. Sun, J., & Yu, H. (2013). Microstructure development and mechanical properties of quenching and partitioning (Q and P) steel and an incorporation of hot-dipping galvanization during Q and P process. *Materials Science and Engineering*, 586, 100-107. doi: 10.1016/j.msea.2013.08.021. (in English)

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. И. А. Вакуленко (Украина)

Надійшла до редколегії: 06.12.2017

Прийнята до друку: 16.03.2018