



УДК 669.74

Поступила 04.06.2013

А. Б. СЫЧКОВ, Магнитогорский государственный технический университет им. И. Г. Носова,  
А. Б. СТЕБЛОВ, С. Н. БЕРЕЗОВ, ООО «Литон Технологии»

## О ВЫБОРЕ МАТЕРИАЛА И РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛЬНЫХ МЕЛЮЩИХ ШАРОВ, ОТВЕЧАЮЩИХ ТРЕБОВАНИЯМ СОВРЕМЕННОГО МИРОВОГО РЫНКА

*В настоящей статье поставлена задача – выбрать эффективные химический состав стали и режим термической обработки при производстве стальных мелющих шаров.*

*The task of this article is to choose effective chemical composition of the steel and heat treatment regime in the production of steel grinding balls.*

Объем потребления шаров для помола материалов составляет около 3 млн. т в год. Основными потребителями являются металлургическая, цементная и энергетическая отрасли.

Назначение мелющих шаров, области их применения, основные процессы изготовления, требования потребителей подробно изложены в работах [1, 3]. Стальные мелющие шары производятся методом пластической горячей деформации, как правило, из сталей, близких к эвтектоидным. Шары, производимые в СНГ по ГОСТ 7524-89 [4], имеют невысокую твердость поверхности 40–62HRC и глубину закалки до 15 мм. Твердость шаров ведущих брендовых фирм Moly-Cop, Gerdau Amersteel, AGS и др. составляет 60–65HRC практически по всему сечению шара очевидно, поэтому их стоимость 900–1500 долл. США за 1 т.

В табл. 1 приведены данные по химическому составу и механическим свойствам сталей (распределение твердости по радиусу поперечного сечения шаров), соответствующие требованиям российской нормативной документации (ГОСТ 24182 заменен на ГОСТ 51685), ГОСТ 5950, а также требованиям мировой практики по изготовлению мелющих шаров.

Анализ работ [1–10], табл. 1 и особенностей структурообразования при производстве мелющих шаров диаметром 15–140 мм повышенного качества позволяет отметить следующее.

1. Необходимо отдать предпочтение материалу из стали для изготовления шаров вместо чугуна,

так как для получения заданных свойств мелющих шаров следует использовать сложнелегированный химический состав чугунов или комплексно-легированные хромом, марганцем, титаном, бором, алюминием, ниобием и другими элементами белые чугуны, или серый чугун повышенной прочности, что обуславливает высокую стоимость этих материалов и соответственно низкую эффективность производства из них мелющих шаров. Кроме того, процесс производства литых качественных мелющих шаров достаточно сложен, значительны потери материала на литниковую систему.

2. В отечественных стандартах допускается пониженный уровень механических свойств (твердости) по радиусу шаров по сравнению с передовой зарубежной практикой. Так, в ГОСТ 7524 отмечены низкие нормативы по твердости для поверхности шаров диаметром 15–120 мм – 35–43 HRC (первая группа), 38–49 HRC (вторая группа), 50–55 HRC (третья группа), 55 и 45 HRC (четвертая группа) соответственно на поверхности и глубине 0,5 радиуса шара. Причем если для 1–3 групп нормируется только поверхностная твердость для всего диапазона шаров (15–120 мм), то для 4-й группы – диаметром 15–70 мм.

3. Лучшие зарубежные шары имеют нормативную поверхностную твердость не менее 64 HRC, а в центре шара – 62–64 HRC.

4. Обычно применяются следующие режимы поточной термической обработки стальных катающих шаров, полученных методом поперечно-вин-

Таблица 1. Химический состав сталей и распределение твердости мелющих шаров

Марка стали	Массовая доля химических элементов, %													Твердость HRC			
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	N	V	Mo	Al	B	Ti	поверхность	на 1/2 радиуса	в центре
<i>Литературные данные</i>																	
ГОСТ 24182 заменен на ГОСТ 51685	0,74–0,82	0,75–1,15	0,40–0,80	–	–	0,40–0,60	–	–	–	0,05–0,15	–	≥ 0,02	–	0,007–0,025	Макс. 42 ед.	–	–
ГОСТ 5950, сталь X	0,95–1,10	0,15–0,45	0,10–0,40	–	–	1,30–1,60	–	–	–	–	–	–	–	–	55 <sup>2</sup>	–	45
ГОСТ 5950, сталь ХТС	0,99–1,05	0,40–0,70	0,85–1,25	–	–	1,30–1,65	–	–	–	–	–	–	–	–	55 <sup>2</sup>	–	45
[3]: Moly Sor	Нет сведений	Нет сведений	Нет сведений	Нет сведений	Нет сведений	↔ 1,0	Нет сведений	≥ 62	–	≥ 60							
[4]: заэвтектоидная сталь	1,2–1,6	0,2–12	0,75–2,5	+	+	+	+	+	–	–	–	+	–	–	–	–	–
[5]: заэвтектоидная сталь	–	0,72–5,77	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	Макс. 53 при Mn 3,5–4,5%	–	–
[6]: Ш12	0,60–0,90	0,60–0,80	0,15–0,35	0,040	0,040	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,30	–	–	–	–	–	–	62	50–6 мм от поверхности	40–24 мм от поверхности
[6]: новая марка	0,65–0,75	0,70–0,80	0,20–0,35	0,035	0,035	0,40–0,50	≤ 0,30	≤ 0,30	0,005–0,025	–	–	0,015–0,020	0,001–0,003	0,005–0,010	62	62–12 мм от поверхности;	40–20 мм от поверхности
[7]: 55СМФА	0,53–0,60	0,30–0,60	0,80–1,10	0,025	0,025	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,25	–	0,15–0,25	0,40–0,60	–	–	–	55–58	–	–
<i>Предлагаемые варианты по химическому составу и формируемой твердости<sup>3</sup></i>																	
УО стали 110Х2Г2САНФ	0,9–1,2	0,8–1,5	≤ 50	≤ 0,015	≤ 0,010	1,0–1,7	0,40–0,60	≤ 0,30	≤ 0,015	0,15–0,25	–	≤ 0,005	–	–	64–62	64–62	64–62
УО стали 110Х2Г2САМФ	0,9–1,2	0,8–1,5	≤ 50	≤ 0,015	≤ 0,010	1,3–1,7	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,015	0,15–0,25	0,20–0,40	≤ 0,005	–	–	64–62	64–62	64–62
УО стали 110Х2Г2САНФР	0,9–1,2	0,8–1,5	≤ 50	≤ 0,015	≤ 0,010	1,0–1,7	0,40–0,60	≤ 0,30	≤ 0,015	0,15–0,25	–	≤ 0,005	0,005–0,010	–	64–62	64–62	64–62
УО стали 110Х2Г2САМФР	0,9–1,2	0,8–1,5	≤ 50	≤ 0,015	≤ 0,010	1,3–1,7	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,015	0,15–0,25	0,20–0,40	≤ 0,005	0,005–0,010	–	64–62	64–62	64–62

Примечание. + – элемент нормируется, но не указан в литературном источнике. – элемент не нормируется для данной марки стали. УО – условное обозначение предлагаемой марки стали. <sup>2</sup> Термическая обработка по следующему режиму: закалка с 840–860 °С в масле и отпуск при 100 °С. <sup>3</sup> Применяется термическая обработка.

товой горячей прокатки. Один из таких способов – метод одностадийного охлаждения в потоке воды в течение до 35 с, другой метод – двухстадийного охлаждения: на первой стадии – поточное водяное охлаждение в закалочном баке в течение 30 с с температурой самоотпуска на уровне 220–250 °С, на второй стадии – в проточной воде на полках конвейера в течение 45 с для шаров диаметром 40–60 мм с обеспечением температуры самоотпуска на уровне 200 °С. Для стали с химическим составом марки типа 75 Г твердость на поверхности шара была равна 62 HRC, глубине 6 мм – 50 HRC, на глубине 8 мм – 40 HRC. Для стали с химическим составом марки типа 75ХГРТЮ прокаливаемость шара увеличивается – уровень твердости, равный 62 HRC, сохраняется на глубине 12 мм. Таким образом, имеется значимая связь структурно-свойств от химического состава стали и режима термической обработки.

Таким образом, в настоящей статье поставлена задача – выбрать эффективные химический состав стали и режим термической обработки при производстве стальных мелющих шаров.

С учетом того, что углерод, марганец, хром и молибден будут работать в сталях как упрочняющие элементы (углерод, марганец и хром, в первую очередь по твердорастворному механизму, молибден – карбидообразующий элемент), ванадий и никель – элементы, повышающие ударную вязкость сердцевины мелющих шаров: ванадий нитридообразующий элемент, обеспечивающий дисперсионное твердение металла, а никель – одновременно повышает прокаливаемость стали и улучшает сопротивление ударным нагрузкам, поэтому, по нашему мнению, наиболее приемлема для про-

изводства качественных мелющих шаров сталь, химический состав которой приведен в табл. 2.

Таблица 2. Рекомендуемый химический состав стали для шаров повышенного качества

Вариант	Массовая доля химических элементов, не более, %						
	C	Mn	Si	Cr	V	Ni	Mo
1	0,9–1,2	0,8–1,5	0,50	1,0–1,7	0,15–0,25	0,40–0,60	–
2	0,9–1,2	0,8–1,5	0,50	1,3–1,7	0,15–0,25	–	0,20–0,40

Для обеспечения мелющим шарам высоких значений твердости (64–62 HRC) и относительно равномерного ее распределение по радиусу шара следует эмпирически подобрать режимы поточной термообработки – режимы термоциклирования прокатанных на станах поперечно-винтовой прокатки.

Термоциклирование заключается в многократном повторении процессов закалка – выравнивание температуры на воздухе за счет самоотпуска закаленных слоев теплом сердцевины шара. При этом каждый последующий цикл будет обрабатывать последующий слой от поверхности к сердцевине шара, получая (при правильном подборе параметров термической обработки – время и интенсивность закалки и время выравнивания температуры в зависимости от диаметра шара) равную твердость в пределах 64–62 HRC. Количество термоциклов будет увеличиваться с повышением диаметра мелющего шара (от 15 до 120 мм) от 2 до 4–5 циклов.

Для уточнения режимов термоциклирования можно использовать методы математического моделирования с уточнением его результатов прямым экспериментом в лабораторных и промышленных условиях.

## Литература

1. Стеблов А. Б., Березов С. Н., Козлов А. А. Литые чугунные шары для помола материалов // Литье и металлургия. 2012. № 3 (66). С. 45–49.
2. Обзор рынка стальных помольных шаров в России и прогноз его развития в условиях финансового кризиса. Исследовательская группа ШинФоМайнХ – демонстрационная версия. М., май 2009.
3. Поддубный А. Н. Краткий обзор технологий, применяемых в мировой практике при производстве мелющих тел // Литейщик России. 2008. С. 30–35.
4. ГОСТ 7524-89, ГОСТ 24182 – ГОСТ 51685.
5. Moly-Cop Canada. BCIC Case Study Library. N 0015 // British Columbia Innovation Council. Thompson Rivers University. April 2009. P. 1–11.
6. Графитизированные стали в машиностроении / И. А. Акимов, И. П. Волчок и др. // Литье и металлургия. 2010. № 4 (58). С. 55–57.
7. Нетребко В. В., Волчок И. П. Особенности легирования марганцем износостойких высокохромистых чугунов // Литье и металлургия. 2012. № 3 (87). С. 162–165.
8. Освоение производства мелющих шаров особо высокой твердости / А. Ю. Юрьев, О. П. Атконова, Л. В. Корнева и др. // Сталь. 2008. № 12. С. 108–109.
9. Грибовский П. К., Кириленко О. М., Политов В. А. Освоение технологии производства сортового горячекатаного проката диаметром 80, 90, 100 мм из стали марки 55СМ5ФА в условиях РУП «БМЗ» // Литье и металлургия. 2010. № 3 (57). С. 186–190.
10. Кукуй Д. М., Федуров В. Н. Разработка легированной матрицы для создания белорусских инструментальных сталей на базе стали 70К (У7А) производства РУП «БМЗ» (обзор и исследование) // Литье и металлургия. 2004. № 2 (30). С. 109–116.