

Лам М. М., Серов А. И., Тернавский А. Н.,
Базарова Г. С.
ПАО «Донецкий металлпрокатный завод»

Смирнов Е. Н. /д. т. н./
ДонНТУ

Технология производства и уровень качества мельющих шаров Ø30 мм из высокоуглеродистой непрерывнолитой стали производства ПАО «Донецкий металлпрокатный завод»

Представлены результаты промышленных испытаний мельющих шаров Ø30 мм группы твердости III в условиях ПАО «Южный горно-обогатительный комбинат». Показано, что при замене ими мельющих шаров Ø40 мм группы твердости III текущей поставки ПАО «МК «Азовсталь» не менее чем на 1,37 % повышается эффективность измельчения (по готовому классу крупности – 0,074) при практически неизменных качественных показателях концентрата, а также сокращения их удельных расходов на 0,006 и 0,012 кг/т руды и концентрата марки К3 соответственно. Ил. 3. Табл. 5. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: шаропрокатный стан, мельющие шары, группа твердости, контейнер для самоотпуска, температурный режим

The results of industrial tests of Ø30 mm III hardness group grinding balls in conditions of OJSC «Southern Mining and Processing Plant» are presented. It is shown that in case change them grinding balls Ø40 mm III hardness group produced on OJSC «МК «Azovstal» not less than 1,37 % increases the efficiency of grinding (for finished class size – 0,074) with almost constant qualitative indicators concentrate and reduce their specific consumption at 0,006 and 0,012 kg/t of ore and concentrate brand K3 respectively.

Keywords: ball-rolling mills, grinding balls, group of hardness, autotempered container, temperature mode

Постановка проблемы

Операции подготовки руды связаны с дроблением и измельчением твердых абразивных материалов. При этом к качеству измельчения материалов применяются все более высокие требования [1].

В большинстве случаев на действующих горно-обогатительных комбинатах (ГОК) данная проблема, при невозможности заменить помольное оборудование, решается несколькими путями. Наиболее часто встречаемыми следует считать: во-первых, применение мельющих тел повышенной твердости с целью стабилизации их гранулометрического состава во время работы [2]; во-вторых, применение на поздних стадиях помола более мелких тел.

Все вышеизложенное в полной мере касается процесса измельчения на помольном оборудовании, использующем в качестве мельющих тел шары (МШ). Однако достигаемые в каждом конкретном случае технологические и качественные параметры могут иметь существенный разброс, зависящий от совокупности факторов (типа мельницы и ее состояния, характеристик используемой руды, качества МШ конкретного производителя и т. д.) и требуют проведения предварительных оценочных промышленных испытаний.

Анализ последних исследований и публикаций

В качестве аргументов, подтверждающих обоснованность промышленной реализации указанных подходов в случае использования МШ, целесообразно привести результаты следующих исследований.

В трех мельницах МШР 4,0×5,0 первой стадии измельчения Михайловского ГОКа [3] были проведены сравнительные испытания трех партий МШ Ø125 мм из рельсовой стали, выпускаемой металлургическим комбинатом «Азовсталь» (партии Т и М) и Нижнетагильским металлургическим комбинатом (НТМК). МШ партии Т (объем 500 т) соответствовали твердости 376 НВ, партии М (объем 500 т) – 362 НВ, партии НТМК (объем 440 т) – 392 НВ.

Результаты испытаний показали, что удельный расход МШ опытных партий связан с их средней твердостью. Было установлено, что увеличение твердости МШ на 1 % обеспечивает снижение их удельного расхода примерно на 2 %.

Испытания МШ на Качканарском ГОКе Ø40 и Ø60 мм стандартного и повышенного качества проводились в параллельно работающих мельницах МШР 3,2×4,5 объемом 34 м³. Средняя производительность мельниц 158 т/ч [4].

Исследования показали эффективность применения МШ из сталей марок Ш-1, Ш-2 и 18ХГТ-25ХГТ. Износостойкость МШ повышенной твердости (Ш-1, Ш-2) и из низколегированной стали, закаленной на предельную твердость (18ХГТ-25ХГТ), на 10-15 % выше износостойкости МШ из стали марки Ст 6. Благодаря внедрению на ГОКе МШ повышенной твердости из стали Ш-1, Ш-2 был получен экономический эффект в сумме 221,3 тыс. руб. в год. При применении МШ из стали марок 18ХГТ-25ХГТ экономический эффект дополнительно увеличивается на 196 тыс. руб. в год.

На Центральном горно-обогатительном комбинате в двух мельницах МШЦ 3,6×5,0 (вторая стадия измельчения магнетитовой руды) испытывали МШ Ø 60 и Ø 80 мм (изготовлены заводом «Азовсталь» из углеродистой стали), закаленные способом двухстадийного охлаждения с содержанием в стали углерода соответственно 0,35-0,43 % и 0,63-0,77 %, твердостью 480÷520 и 450÷500 НВ, а также закаленные МШ по принятой технологии [5].

В процессе работы установлен наибольший срок службы опытных МШ, обладающих высокой ударостойкостью. Экономия металла составила 5 %. Использование МШ с повышенной поверхностной и объемной твердостью улучшает качество выпускаемой продукции.

На ряде горно-обогатительных предприятий успешно применяют отработанные МШ первых стадий шарового помола в последующих стадиях доизмельчения минерального сырья с целью их экономии.

В процессе работы шаровых мельниц первой стадии измельчения катаные МШ, получаемые с шаропрокатного стана Кузнецкого металлургического комбината (КМК), в отличие от кованных, изнашиваются ко времени их замены до Ø30÷80 мм. Эти МШ без сортировки можно использовать в мельницах второй стадии измельчения, что позволит резко сократить их расход. В результате, экономия составила 19 тыс. руб. в год [6]. Кроме того, практика измельчения, в частности, железистых кварцитов показала, что применение более мелких МШ Ø25÷30 мм в третьей стадии помола повышает эффективность доизмельчающих циклов до 25 % и сокращает их расход.

Из всего вышесказанного можно сделать однозначный вывод о том, что дальнейшее улучшение качества измельчения с одновременным снижением удельных расходов МШ достигается как в результате повышения их прочностных свойств, так и использования более мелких МШ на поздних стадиях помола.

Цель работы

Разработка технологии производства и оценка уровня качества МШ Ø30 мм группы твердости Ш из высокоуглеродистой непрерывнолитой стали производства ПАО «Донецкий металлпрокатный завод» при использовании в мельницах третьей стадии измельчения железистых магнетитовых кварцитов.

Изложение результатов исследования

Производство МШ в условиях ПАО «Донецкий металлпрокатный завод» (ПАО «ДМПЗ») осуществляется на шаропрокатном стане ШПС 30-80 [7]. Следует отметить, что строительство ШПС 30-80 (рис. 1) являлось завершающим звеном во впервые созданной в Украине (в рамках вертикально-интегрированного холдинга) сквозной технологической схемы [8] производства МШ диаметра 30÷80 мм из непрерывнолитой углеродистой стали, отливаемой в заготовку малого сечения (от 120×120 мм до 150×150 мм) и соответствующих III и IV группам твердости по ГОСТ 7524-89 и ДСТУ3499-97 (рис. 2).

Выполненный в период июль-сентябрь 2013 г. комплекс исследовательских работ позволил разработать, с одной стороны, технологию производства МШ групп твердости III и IV, а с другой – создал все предпосылки для расширения освоенного сортамента в сторону конструктивно регламентированного минимального диаметра МШ.

При разработке технологии производства МШ Ø30 мм групп твердости III и IV химический состав стали оставили таким же, как и в случае производства МШ Ø40 мм: (0,74÷0,75 % С; 0,67÷0,72 % Mn; 0,24÷0,28 % Si; S ≤ 0,015 %; P ≤ 0,015 %; Cr ≤ 0,3 %; Ni ≤ 0,15 %). В тоже время, масса МШ Ø30 мм, по сравнению с МШ Ø40 мм, в 2,4 раза меньше, а, следовательно, меньше и их теплосодержание. Данное обстоятельство потребовало корректировки технологического регламента их производства, особенно в части оптимизации расхода охлаждающей воды, числа зон охлаждения в закалочной барабанной установке шнекового типа, а также температур загрузки МШ в закалочную установку и контейнеры для самоотпуска.

Для производства МШ Ø30 мм групп твердости III и IV регламентируемые значения температуры в стационарных и периодических точках ее контроля были приняты в следующих пределах:

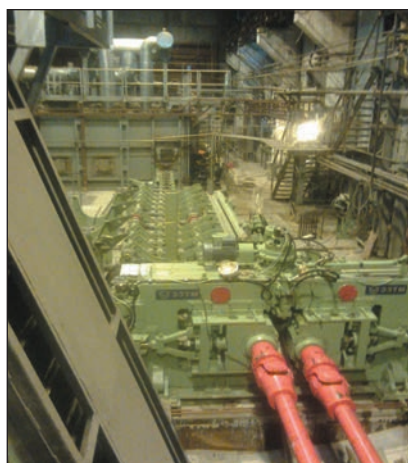
- температура нагрева заготовки 1050-1100 °С;
- температура заготовки перед ШПС 30-80 – 950-1000 °С;
- температура шаров перед загрузкой в закалочную барабанную установку 840-860 °С;



а)



б)



в)



г)



д)

Рис. 1. Внешний вид агрегатов ШПС 30-80 ПАО «ДМПЗ»:

- а - нагревательная печь фирмы «FORNI»;
- б - шаропрокатный стан конструкции ЭЗТМ;
- в - закалочная установка шнекового типа с трехколлекторной схемой поди воды в барабан;
- г - контейнер для самоотпуска;
- д - шаропрокатный стан ДМПЗ



Рис. 2. Интегрированная технологическая схема производства МШ: ПАО «Электросталь» (г. Курахово) – ПАО «Донецкий металлопрокатный завод»

ПРОКАТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

- температура металла перед загрузкой в контейнер для самоотпуска 190-210 °С;
- температура самоотпуска шаров ≤ 200 °С;
- температура выдачи шаров на сортировочный стол ≤ 60 °С.

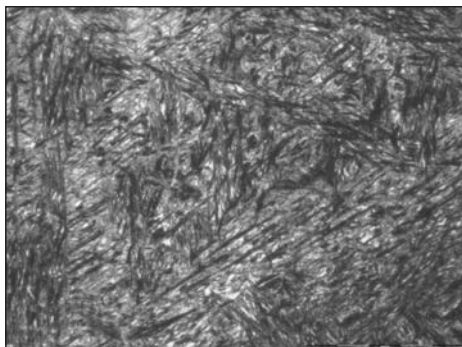
Число задействованных зон охлаждения в барабанной установке – одна или две.

Время нахождения МШ в контейнерах для самоотпуска должно составлять не менее 24 часов при реализации двухскоростного графика их охлаждения. При этом темп выдачи заготовок из нагревательной печи составляет 33-34 с, а производительность стана 3,0-3,5 т/час.

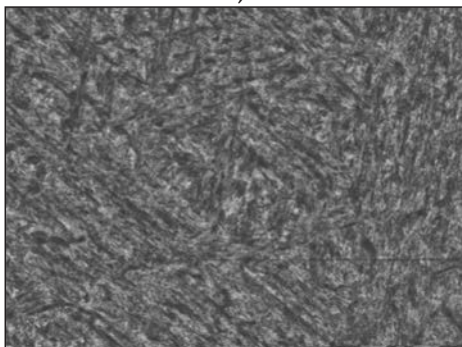
Процесс прокатки шаров осуществлялся в валка имеющих 5-ти заходную калибровку, разработанную ОАО АХК «ВНИИМЕТМАШ».

Реализация принятого температурно-скоростного регламента позволила получить следующие результаты (средние значения НВ (HRC)): поверхность – 602-621 (62-64); половина радиуса – 583-602 (60-62).

Из приведенных данных видно, что твердость поверхности и на глубине половины радиуса шара удовлетворяет требованиям ГОСТ 7524 не только для III, но и для IV группы: соответственно, НВ 534 (HRC 55,0) и НВ 415 (HRC 45,0). При металлографическом исследовании у МШ исследованных партий по всему сечению выявлена мартенситная структура, свидетельствующая о сквозной прокаливаемости при закалке (рис. 3).



а)



б)

Рис. 3. Микроструктура (x500) мелющих шаров $\varnothing 40$ мм:

а – поверхность; б – центр

Сравнительные промышленные испытания проводили в условиях ПАО «Южный горно-обогатительный комбинат» (г. Кривой Рог) на двух мельницах III стадии измельчения с одинаковыми эксплуатационными параметрами (типа МШЦ 4,5×6,0):

- в мельницу № 34 секции № 3 РОФ-2 загружали МШ опытной партии $\varnothing 30$ мм группы твердости III производства ПАО «ДМПЗ»;

- в мельницу № 14 секции № 1 РОФ-2 загружали МШ текущей поставки $\varnothing 40$ мм группы твердости III производства ПАО «МК «Азов-сталь».

Объем опытной партии МШ $\varnothing 30$ мм группы твердости III составил 405,5 т.

Выполненная перед загрузкой в мельницу первичная визуальная оценка геометрии МШ показала, что они имеют правильную сферическую форму без видимых дефектов на поверхности. Контроль геометрических размеров МШ на отобранных пробах показал, что геометрические размеры испытуемых МШ соответствуют требованиям технических условий ДСТУ 3499-97, а их насыпной вес составляет 4,525 т/м³.

Для достижения максимальной степени сопоставимости результатов промышленных исследований, было выполнено несколько обязательных процедур.

Во-первых, в сравнительный период в мельнице № 34 должны находиться только МШ $\varnothing 30$ мм группы твердости III производства ПАО «ДМПЗ». С этой целью за период с 01.03.2014 г. по 07.05.2014 г. в мельницу № 34 РОФ-2 было догружено 142,8 т испытуемого МШ. Это позволило утверждать, что в мельнице произошла смена МШ: находящийся на момент начала испытаний в мельнице шар сработался и остался только опытный.

Во-вторых, степень заполнения МШ мельниц № 34 и № 14 должна быть не только одинаковой, но и учитывать изменения насыпного веса за счет истирания при проведении инструментальных замеров.

Коэффициент изменения насыпного веса определяется отношением насыпного веса МШ бывших в употреблении к насыпному весу новых, взвешенных в одинаковых емкостях-объемах, и составил 1,053. Тогда расчетный насыпной вес МШ, в текущей шаровой загрузке мельницы № 34 с установившимся гранулометрическим составом, с учетом коэффициента изменения насыпного веса принял значение $4,525 \times 1,053 = 4,765$ т/м³, где 4,525 – насыпной вес новых шаров.

Результаты инструментальных замеров степени заполнения МШ мельниц № 34 и 14 в пе-

риод испытаний (с 07.05.2014 по 22.07.2014 г.) представлены в табл. 1.

С учетом вышеизложенного, средние результаты проверки геометрических размеров и форм МШ в мельнице № 34 РОФ-2 в период с 07.05.2014 по 22.07.2014 г. представлены в табл. 2. При этом геометрические размеры шаров контролировались при помощи штангенциркуля, а состояние поверхности и изменение формы шаров определялось визуально.

Визуальный осмотр МШ показал, что 95,3 % имеют равномерный износ и правильную сфе-

рическую форму. Сколы и раковины на поверхности шаров не были обнаружены. Данный факт служит прямым доказательством высокой степени равномерности закалки МШ в условиях ШПС 30-80.

Выявленное в мельнице № 34 большое число мелких мелющих тел, не потерявших сферическую форму, нашло свое прямое отражение и в качестве продуктов третьей стадии измельчения (табл. 3).

Как видно из табл. 3, средний прирост по готовому классу крупности (-0,074 мм) пром-

Таблица 1

Результаты инструментальных замеров степени заполнения МШ мельниц

Дата	Мельница № 34		Мельница № 14	
	Степень заполнения, %	Количество шаров в мельнице, т	Степень заполнения, %	Количество шаров в мельнице, т
07.05.2014 г.	36,1	142,77	39,2	150,6
23.05.2014 г.	37,0	146,33	38,5	147,9
11.06.2014 г.	36,8	145,54	39,0	149,9
22.07.2014 г.	41,8	165,31	40,6	156,0

Таблица 2

Результаты проверки геометрических размеров и формы МШ

Наименование	Средний диаметр МШ, мм	Выход, %	Визуальная характеристика поверхности МШ (соответствие требованиям ТУ)
МШ правильной формы	30,0	6,9	соответствует
МШ правильной формы, меньшие по весу и диаметру	8,5-27,0	88,4	соответствует
Половинки	-	-	-
МШ с углублениями на поверхности	16,4	0,1	-
Кубические формы	Средний размер 10×10×10 мм	1,2	-
МШ с раковиной	14,6	0,3	-
Скрап	6-8	3,1	-
Итого		100	

Таблица 3

Результаты сравнительного опробования продуктов узлов третьих стадий измельчения

№ опробования	Наименование продукта	Мельница № 34		Мельница № 14	
		массовая доля класса -0,074 мм	прирост по готовому классу -0,074 мм	массовая доля класса -0,074 мм	прирост по готовому классу -0,074 мм
1	Питание мельницы	74,20	10,60	74,80	7,60
	Разгрузка мельницы	84,80		82,40	
2	Питание мельницы	75,20	9,30	74,40	8,70
	Разгрузка мельницы	84,50		83,10	
3	Питание мельницы	74,20	10,40	74,90	8,70
	Разгрузка мельницы	84,60		83,60	
4	Питание мельницы	75,20	9,50	74,60	8,50
	Разгрузка мельницы	84,70		83,10	
5	Питание мельницы	74,60	9,80	74,70	8,20
	Разгрузка мельницы	84,40		82,90	
6	Питание мельницы	74,30	8,90	74,60	8,60
	Разгрузка мельницы	83,20		83,20	
Среднее	Питание мельницы	74,62	9,75	74,67	8,38
	Разгрузка мельницы	84,37		83,05	

ПРОКАТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

продукта в разгрузке мельницы № 34 выше на 1,37 %, чем в разгрузке мельницы № 14.

Что касается сравнения основных производственных показателей работы секций № 3 и № 1, то следует особо подчеркнуть, что выявленное (на уровне 5,5 %) снижение объема производства концентрата на секции № 3 имеет вполне конкретное объяснение. На секции № 3 на момент проведения испытаний не была внедрена в полном объеме АСУ ТП производства концентрата, как на секции № 1. По этой причине эффективность работы технологического оборудования секции № 3 ниже.

Качественные показатели концентрата, произведенного на сравниваемых секциях № 1 и № 3, оказались практически одинаковыми (табл. 4).

Для определения удельного расхода шара за период с 07.05.2014 по 22.07.2014 г. учитывались результаты инструментальных замеров и производственные показатели работы секций № 3 и № 1 РОФ-2 (табл. 5).

Удельный расход мелющих тел на 1 т переработанной руды ($a_{ш}$) и произведенного концентрата секцией ($B_{ш}$), за период определения технологических показателей, определяется формулами:

$$a_{ш} = \frac{G_{ш} + (G_n - G_k)}{T}, \quad (\text{кг/т});$$

$$B_{ш} = \frac{G_{ш} + (G_n - G_k)}{T \cdot \gamma}, \quad (\text{кг/т}),$$

где $\gamma = \frac{P_{кон}}{T}$ – выход конечного концентрата секции, дол. ед.;

По данным табл. 5 удельный расход МШ составил:

– опытных Ø30 мм (группа твердости III, производство ПАО «ДМПЗ») по мельнице третьей стадии измельчения № 34 секции № 3 РОФ-2:

– по исходной руде – 0,3134 кг/т руды;

– по концентрату марки К3 – 0,6796 кг/т концентрата;

– текущего Ø40 мм (группа твердости III, производство ПАО «МК «Азовсталь») по мельнице третьей стадии измельчения № 14 секция 1 РОФ-2:

• по исходной руде – 0,3193 кг/т руды;

• по концентрату марки К3 – 0,6913 кг/т концентрата.

На основании расчетов удельных расходов опытной партии МШ Ø30 мм в мельнице № 34 и сравнительной партии МШ текущей поставки Ø40 мм в мельнице № 14 РОФ-2, удельный расход МШ Ø30 мм ниже, чем МШ Ø40 мм:

$$\Delta a_{ш} = 0,3193 - 0,3134 = 0,006 \text{ (кг/т руды);}$$

$$\Delta B_{ш} = 0,6913 - 0,6796 = 0,012 \text{ (кг/т концентрата).}$$

Выводы

Впервые в Украине в рамках вертикально-интегрированного холдинга реализована сквозная технологическая схема производства МШ малого диаметра III и IV группы твердости из непрерывнолитой углеродистой стали, отливаемой в передельную заготовку малого сечения: от 120×120 мм до 150×150 мм. Разработанный технологический регламент прокатки и термической обработки позволил за первые шесть меся-

Таблица 4

Качественные показатели концентрата

№ секции	Переработка руды за период, т	Производство концентрата за период, т	Качество исходной руды по Fe маг., %	Качество концентрата, Fe общ., %
Секция № 3	603747,0	278404,0	27,52	65,09
Секция № 1	637357,0	294380,0	27,56	65,15
Отклонение				-0,06

Таблица 5

Результаты инструментальных замеров и производственные показатели работы

Номер мельницы, тип МШ	Степень заполнения мельницы шарами		Масса мелющих тел в мельнице в начальный период, G_n , т	Масса мелющих тел в мельнице в конечный период, G_k , т	Догружено шара, т	Исходного шара, $G_{ш}$, т	Переработано руды, Т, т	Произведено концентрата, $P_{кон}$, т	Выход концентрата из руды, γ , дол. ед.
	%	тонн							
№ 34, опытные Ø30 мм	37,9	150,0	142,77	165,31	189,2	211,74	603748	278404	0,4611
№ 14, текущие Ø40 мм	39,3	151,1	150,64	156,02	203,5	208,9	637357	294380	0,4619

цев с момента начала освоения ШПС 30-80 производить МШ групп твердости III и IV трех типоразмеров. Промышленные испытания мелющих шаров Ø30 мм группы твердости III в условиях ПАО «Южный горно-обогатительный комбинат» показали, что при замене ними мелющих шаров Ø40 мм группы твердости III текущей поставки ПАО «МК «Азовсталь» не менее чем на 1,37 % повышается эффективность измельчения (по готовому классу крупности – 0,074) при практически неизменных качественных показателях концентрата, а также сокращения их удельных расходов на 0,006 и 0,012 кг/т руды и концентрата марки К3 соответственно.

Библиографический список

1. Blickensderfer R. Evaluation of commercial US grinding balls by laboratory impact and abrasion test / R. Blickensderfer, J. H. Tylczak // Minerals & Metallurgical processing. – 1989, May. – P. 80-86.
2. Андреев С. Б. Дробление, измельчение и грохочение / С. Б. Андреев, В. В. Зверичев, В. А. Перов. – М.: Недра, 1986. – 392 с.
3. Щербаков О. К. О снижении расхода мелющих тел при измельчении руд / О. К. Щербаков, Г. Н. Редькин, Г. В. Балашов, С. Ф. Дятлова // Обогащение руд черных металлов. – М.: Недра. – 1979. – Вып. 8. – С. 57-63.

4. Редькин Г. Н. Промышленные испытания мелющих шаров усовершенствованной термической обработки / Г. Н. Редькин, С. Ф. Дятлова, Г. И. Игошин, М. Г. Гаврилец // Горный журнал. – 1983. – № 4. – С. 61.

5. Новая технология упрочняющей термической обработки мелющих шаров в потоке стана / В. Я. Савенко, В. И. Горбатов, В. Л. Варбаров [и др.] // Сталь. – 1983. – № 1 – С. 57-59.

6. Бахтилов Н. Е. Использование отработанных шаров шаровых мельниц I стадии измельчения // Черметинформация. – 1980. – Вып. 9. – С. 23.

7. Строительство шаропрокатного стана на ПАО «Донецкий металлопрокатный завод» / В. Ю. Кулак, В. А. Биллер, М. А. Василенко [и др.] // Metallurg. и горноруд. пром-сть. – 2014. – № 5. – С. 36-39.

8. Высокоэффективные технологические схемы и интеграция – основа повышения качества проката ответственного назначения / А. А. Минаяев, А. Н. Лубенец, Е. Н. Смирнов [и др.] // Металл и литье Украины. – 2002. – № 7-8. – С. 35-37.

Поступила 18.04.2015

