

А.М.Нестеренко, В. Л.Плюта, Е.Г.Дёмина

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ МАРГАНЦОВИСТЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕСУРСА ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ ИЗ НИХ МОЛОТКОВ ДРОБИЛОК

Показано, что для изготовления горячекатаного специального профиля типа М1 (с последующим изготовлением молотков дробилок) наиболее рациональной является сталь 75Г2. Установлено, что после закалки с низкотемпературным отпуском в рабочей (бойковой) части молотков из стали 75Г2 достигаются более высокие показатели твёрдости (на 15%) и эксплуатационной стойкости (на 30%) по сравнению с молотками из стали 65Г.

молотки дробилок, сталь, закалка, низкотемпературный отпуск, стойкость

Введение. При операциях измельчения (помола) шихты, в частности, известняка, в агломерационных цехах металлургических предприятий используются однороторные молотковые дробилки ударного действия (рис. 1).

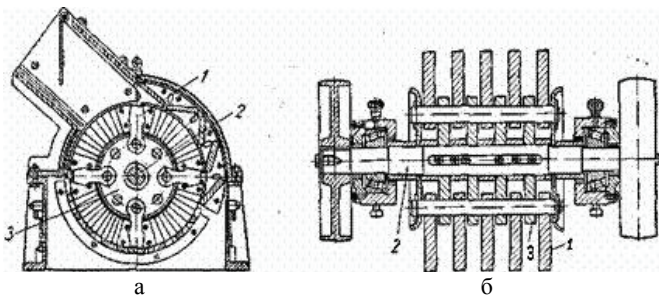


Рис. 1. Схематический вид поперечного (а) и продольного (б) сечений молотковой однороторной дробилки. Обозначения на рис.: 1 – молоток, 2 – вал, 3 – внутренний барабан.

Однороторная молотковая дробилка рассматриваемого типа относится к дробильному оборудованию для мелкого и среднего дробления, при котором средний размер частиц получаемых в результате дробления фракций не превышает 10 мм [1]. Гранулометрический состав конечного продукта можно регулировать, варьируя форму и количество молотков, а также скорость и направление их вращения. Главные рабочие элементы молотковой дробилки – это молотки, которые при помощи шарниров подвижно закрепляются на поверхности ротора. При включении двигателя дробилки ротор начинает вращаться, приводя молотки в движение, – и те на лету ударяют по кускам подающегося в дробилку материала, тем самым, измельчая (фракционируя) его. Помимо молотков, в процессе дроб-

ления принимают участие деки – рифленые плиты из чугуна или стали, и стальные решета. Последние предназначены также для регулирования степени измельчения материала и отвода из дробильной камеры конечного продукта. Среди других видов дробильного оборудования, однороторные молотковые дробилки отличаются такими несомненными достоинствами, как высокая производительность (до 100 тонн готового продукта в час), относительная экономичность и простота в обслуживании. Факторами, ограничивающими применение молотковых дробилок, являются повышенная влажность (до 15%), вязкость, липкость или высокая прочность подлежащего дроблению материала.

Современное состояние вопроса. Ресурс работы дробилок во многом определяется уровнем эксплуатационной стойкости их основных деталей – молотков, которые могут быть изготовлены из сталей разных марок по определенным технологиям. На металлургических и машиностроительных предприятиях Украины в качестве материала для изготовления молотков используется обычно сталь 65Г. Молотки из этой стали производятся по технологии непосредственного литья в специальные формы и по технологии, предусматривающей ковку-штамповку литых заготовок. Для обеспечения требуемого сочетания высокой твёрдости и удовлетворительной вязкости стали в молотках, осуществляющих ударное воздействие на поступающие массы подлежащих измельчению материалов, завершающей операцией технологий их изготовления является термическая обработка (закалка с последующим низкотемпературным отпуском). В частности, Днепровский металлургический комбинат (ДМК) до последнего времени производил закупку штампованных молотков у других предприятий - поставщиков этой продукции, а термическую обработку осуществлял своими силами.

Согласно утверждённой на ДМК технологической инструкции твёрдость металла поверхностной зоны бойков (утолщенных ударных участков) молотков после термической обработки должна составлять 40-50 HRC. Практика использования штампованных молотков из стали 65, обработанных на ДМК по режиму, включающему закалку от температуры 830-850⁰С с последующим низкотемпературным отпуском (выдержка при 430⁰С в течение 4 часов), в дробилках для измельчения известняка в агломерационном цехе ДМК показала их недостаточно высокую стойкость. Это вызывает вынужденные простои дробилок во время ремонтных замен вышедших из строя молотков, дополнительные расходы и снижение производительности работы агломерационного цеха в целом. В связи с этим ДМК совместно с Институтом чёрной металлургии НАН Украины проведены разработки по созданию технологии производства катаных молотков, включающую получение горячекатаного проката (специальный профиль типа М1) из марганцовистых сталей, разделку его на молотки и последующую термическую обработку молотков для обеспечения требуемых параметров их структуры и повышенного комплекса эксплуатацион-

ных характеристик.

Цель настоящей работы заключалась в научно обоснованном определении базовых позиций технологии производства катаных молотков дробильного оборудования – выборе химического состава стали для их изготовления и режимов термической обработки.

Методика исследования. Материал исследования – образцы бойковых участков («бойков») молотковых дробилок в горячекатаном состоянии и после термической обработки. Химический состав исследованных сталей представлен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав исследованных сталей

Марка стали	Содержание основных элементов, % масс.					
	C	Mn	Si	V	S	P
65Г	0,63	0,98	0,18	-	0,027	0,023
75Г2	0,74	1,65	0,21	-	0,034	0,016
75ГФ	0,73	0,96	0,19	0,05	0,025	0,017
Требования нормативной документации					не более	
65Г (ГОСТ 14959)	0,62-0,70	0,90-1,20	0,17-0,37	-	0,035	0,035
75Г2 (ТУУ 322-233-235)	0,71-0,89	1,20-1,80	0,17-0,70	-	0,035	0,018
75ГФ (ТУУ 27.1-4-513)	0,70-0,90	0,70-1,15	0,17-0,70	0,03-0,07	0,040	0,050

Термическую обработку образцов исследованных сталей проводили по режиму, включающему их выдержку в течение 20 мин. в аустенитной области при температуре 850⁰С, закалку в масло и последующий низко-температурный отпуск при температуре 430⁰С в течение 1-4 часа.

Работа выполнена с использованием методов оптической (микроскоп «Ахiovert 200 М МАТ») и электронной (растровый электронный микроскоп фирмы «Карл Цейс» EVO 50 XVP) микроскопии. Твёрдость образцов молотковых дробилок определяли по ГОСТ 9013.

Результаты исследований. Проведенный анализ показал, что основной структурной составляющей образцов исследованных сталей является тонкодифференцированный перлит. При этом минимальными значениями межпластиночного расстояния характеризуется перлит стали 65Г ($\Delta = 0,07-0,15$ мкм), для перлита стали 75Г2 характерен максимальный уровень $\Delta = 0,30-0,75$ мкм. Наиболее «упорядоченное» строение со средним уровнем значений $\Delta = 0,22-0,30$ мкм наблюдается для перлита стали 75ГФ (рис. 2). Данные проведенного микрорентгеноспектрального анализа свидетельствуют о неравномерном распределении углерода, легирующих элементов, серы и фосфора по объёму металла образцов исследованных сталей, а также ванадия в стали 75ГФ (табл. 2). Такого рода микроне-равномерность распределения легирующих элементов и примесей по объёму исследованных образцов обусловлена, как известно [2, 3], эффектом

наследования исходной кристаллизационной микронеоднородности слитков, передающейся через катаную заготовку горячекатаному прокату (специальному профилю М1), из которого, собственно, и изготавливались молотки.

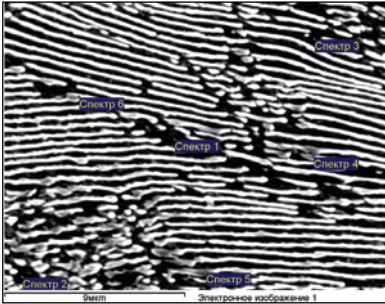


Рис. 2. Строение перлита в стали 75ГФ, $\times 6650$

Количество структурно свободного феррита, имеющего вид тонких прерывистых оконтуровок перлитных колоний, в стали 65Г несколько выше, чем в стали 75Г2, однако при этом его объёмная доля незначительна в обоих сталях и составляет, примерно, 2-5% . В стали 75ГФ количество структурно свободного феррита меньше, чем в сталях 65Г и 75Г2. Он наблюдается, как правило, в виде одиночных извивистых полосок по границам перлитных колоний.

Таблица 2. Результаты микрорентгеноспектрального сканирования разных участков структуры стали 75ГФ (горячекатаное состояние)

Спектр	C	Si	P	S	V	Cr	Mn	Fe	Итого
Сп. 1	3,57	0,19	0,03	0,04	0,22	0,22	0,89	94,84	100,00
Сп. 2	2,84	0,39	0,00	0,02	0,09	0,14	0,45	96,07	100,00
Сп. 3	1,66	0,17	0,05	0,17	0,15	0,12	0,00	97,68	100,00
Сп. 4	4,25	0,00	0,31	0,00	0,10	0,31	1,99	93,04	100,00
Сп. 5	3,47	0,05	0,00	0,04	0,37	0,00	2,07	94,00	100,00
Сп. 6	5,55	0,00	0,23	0,00	0,28	0,22	3,59	90,13	100,00
Среднее	3,55	0,13	0,10	0,05	0,20	0,17	1,50	94,30	100,00
Станд. отклонение	1,31	0,15	0,13	0,06	0,11	0,11	1,32	2,61	
Макс.	5,55	0,39	0,31	0,17	0,37	0,31	3,59	97,68	
Мин.	1,66	0,13	0,03	0,02	0,09	0,12	0,45	90,13	

Примечание: содержание элементов (% масс.)

Полученные экспериментальные данные показывают (табл. 2), что содержание углерода в обособленных участках структурно свободного феррита (позиции и спектры 2, 3) заметно ниже, чем в перлитных колониях (позиции и спектры 1, 4-6). Выраженный разброс значений по содержанию углерода в микрообъёмах исследованных сталей связан с тем же эффектом наследования развитой кристаллизационной микронеоднородности стали, присущей, в особенности, марганцовистым сталям [2, 3].

Термическая обработка по режиму закалка в масле от 850°C с последующим низкотемпературным отпуском при 430°C даже при относительно длительной выдержке 4 часа в принципе не изменяет неравномерный характер распределения углерода, легирующих элементов и примесей в полученной структуре мартенсита отпуска. Кроме этого, в сталях 65Г и 75Г2 отчётливо выявляются выделяющиеся при отпуске микрочастицы комплексных карбидов цементитного типа $(\text{Fe},\text{Mn},\text{Cr})_3\text{C}$, а в стали 75ГФ наряду с продолговатыми микрочастицами $(\text{Fe},\text{Mn},\text{Cr})_3\text{C}$ (позиции и спектры 2, 3, 4 на рис. 3 и в табл. 3) размером $0,30\text{-}0,75 \times 0,90\text{-}1,20$ мкм наблюдаются подобные им по форме микрочастицы комплексного карбида ванадия с кубической ГЦК-решеткой $(\text{V},\text{Mn},\text{Fe})\text{C}$ (позиции и спектры 5, 6 на рис. 3 и в табл. 3) размером $0,15\text{-}0,30 \times 1,05\text{-}1,50$ мкм с повышенными соответственно формульным обозначениям содержаниями углерода, марганца, хрома и ванадия.

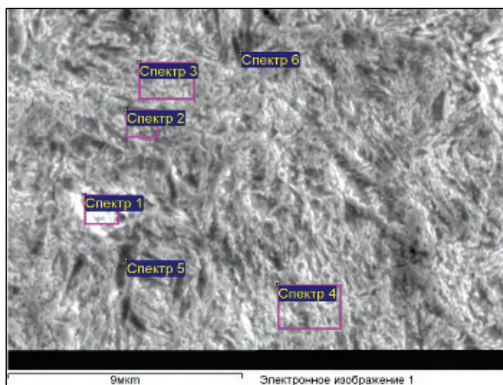


Рис.3. Структура стали 75ГФ после закалки от 850°C и последующего отпуска при 430°C в течение 4 часов, $\times 6650$.

После термической обработки по указанному режиму структура мартенсита отпуска стали 75ГФ характеризуется более дисперсным строением по сравнению с таковой для сталей 65Г и 75Г2 (рис. 4). Это связано с тем, что при закалке в стали 75ГФ формируется мартенсит с более мелкими иглами, чем в сталях 65Г и 75Г2, и это различие сохраняется даже при самой длительной (4 часа) в данной серии выдержке при отпуске (рис. 4). Формирование более мелкозернистой мартенситной структуры в сталях с ванадием по сравнению со сталями без добавок этого элемента объясняется тем, что микрочастицы ванадийсодержащих карбидов и карбонитридов препятствуют росту аустенитного зерна в процессе рекристаллизации аустенита при высокотемпературной выдержке, применяемой для нагрева ванадийсодержащей стали под закалку [4].

Несмотря на более выраженную мелкоиглочатость мартенситной структуры и наличие мелкодисперсных выделений цементита и комплексного карбида ванадия после термической обработки по указанному режиму твёрдость образцов стали 75ГФ лишь незначительно превышает таковую для сталей 65Г и 75Г2 без ванадия, прошедших термическую обработку по тому же режиму (табл. 4).

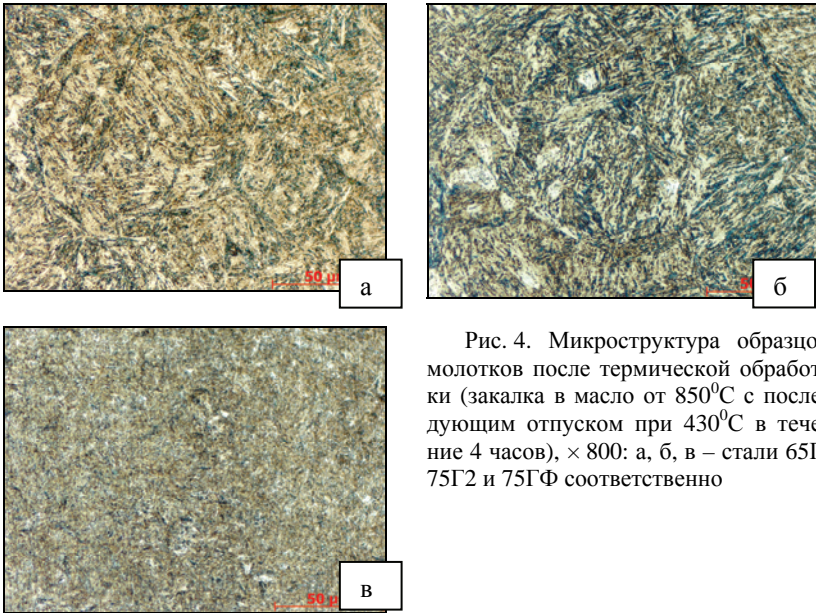


Рис. 4. Микроструктура образцов молотков после термической обработки (закалка в масло от 850⁰С с последующим отпуском при 430⁰С в течение 4 часов), × 800: а, б, в – стали 65Г, 75Г2 и 75ГФ соответственно

Таблица 3. Результаты микрорентгеноспектрального сканирования разных участков структуры стали 75ГФ после закалки от 850⁰С и последующего отпуска при 430⁰С в течение 4 часов

Спектр	C	Si	P	S	V	Cr	Mn	Fe	Итого
Сп. 1	2,69	0,27	0,21	0,00	0,00	0,00	0,92	95,92	100,00
Сп. 2	2,53	0,15	0,15	0,00	0,04	0,15	1,04	95,95	100,00
Сп. 3	2,50	0,19	0,01	0,08	0,00	0,48	1,14	95,60	100,00
Сп. 4	2,49	0,19	0,00	0,08	0,00	0,21	1,22	95,82	100,00
Сп. 5	3,40	0,29	0,50	0,00	0,14	0,00	1,65	94,01	100,00
Сп. 6	4,19	0,20	0,26	0,08	0,33	0,11	1,16	93,67	100,00
Среднее	2,96	0,21	0,19	0,04	0,08	0,16	1,19	95,16	100,00
Станд. отклонение	0,69	0,05	0,19	0,04	0,13	0,18	0,25	1,04	
Макс.	4,19	0,29	0,50	0,08	0,33	0,48	1,65	95,95	
Мин.	2,49	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,92	93,67	

Примечание: содержание элементов (% масс.)

В исходном горячекатаном состоянии значения твёрдости HRC всех сталей, включая 75ГФ, являются низкими (табл. 4), что лишний раз подтверждает необходимость применения термической обработки по режимам, включающим закалку с отпуском, для обеспечения требуемых высо-

ких эксплуатационных характеристик молотков, в нашем случае, их высокой износостойкости.

Таблица 4. Значения твёрдости образцов исследованных сталей в исходном горячекатаном состоянии и после термической обработки по режиму: закалка в масле от температуры 830⁰С (выдержка 20 мин) и низкотемпературный отпуск при 430⁰С в течение 4 часов

№ п/п	Марка стали	Значения твёрдости, HRC	
		в исходном г/к состоянии	после термической обработки
1	65Г	$\frac{9,5 - 16,0}{12,5}$	$\frac{38,5 - 42,5^*}{41,5}$
2	75Г2	$\frac{10,0 - 14,0}{12,0}$	$\frac{46,4 - 49,2}{47,6}$
3	75ГФ	$\frac{10,0 - 13,0}{11,5}$	$\frac{47,8 - 51,5}{49,8}$

* Примечание. Числитель - минимальные и максимальные значения, знаменатель – среднее значение (10 замеров на каждый образец).

Результаты проведенного исследования свидетельствуют о том, что наиболее рациональной в плане применения для изготовления горячекатаного специального профиля типа М1 и молотков дробилок из него с обеспечения требуемых структурных параметров, уровня твёрдости (в пределах 40-50 HRC) и стоимости является сталь 75Г2.

По результатам промышленного опробования на Днепровском металлургическом комбинате им. Ф.Э. Дзержинского установлено, что в рабочей (бойковой) части молотков из горячекатаной стали 75Г2 после термической обработки, включающей закалку с низкотемпературным отпуском, достигаются более высокие показатели твёрдости (на 15%) и эксплуатационной стойкости (на 30%) по сравнению со штампованными молотками из стали 65Г после аналогичной термической обработки. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности разработанной технологии производства горячекатаного специального профиля типа М1 с его последующей разделкой на молотки и их термической обработкой по режимам закалки с низкотемпературным отпуском для повышения технического ресурса дробильных деталей размольного оборудования.

Выводы.

1. Установлено, что в образцах из марганцовистых сталей 65Г, 75Г2 и 75ГФ в горячекатаном состоянии формируется тонкодифференцированная перлитная структура с выраженным микронеоднородным распределением углерода, легирующих элементов и примесей.

2. Определено, что наиболее рациональной для изготовления горячекатаного специального профиля типа М1 и молотков дробилок из него с

обеспечением требуемых структурных параметров, уровня твёрдости (в пределах 40-50 HRC) и стоимости является сталь 75Г2.

3. По результатам промышленного опробования на Днепровском металлургическом комбинате им. Ф.Э. Дзержинского установлено, что в рабочей (бойковой) части молотков из горячекатаной стали 75Г2 после термической обработки, включающей закалку с низкотемпературным отпуском, достигаются более высокие показатели твердости (на 15%) и эксплуатационной стойкости (на 30%) по сравнению со штампованными молотками из стали 65Г после аналогичной термической обработки.

1. *Перов В. А.* Дробление, измельчение и грохочение руд / В.А. Перов, Е.Е. Андреев, Л.Ф. Биленко – М.: Недра, 1990. – 301 с.
2. *Голиков И. Н., Масленков С. Б.* Дендритная ликвация в сталях и сплавах. – М.: Металлургия, 1977. – 224 с.
3. *Ершов Г. С., Позняк Л. А.* Микронеоднородность металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1985. – 214 с.
4. *Меськин В. С.* Основы легирования стали. – М.: Металлургия, 1964. – 684 с.

*Статья рекомендована к печати
докт.техн.наук, проф. Г.В.Левченко*

О.М.Нестеренко, В.Л.Плюта, Е.Г.Дьоміна

Дослідження особливостей структуроутворення марганцевистих сталей для підвищення технологічного ресурсу молотків дробарок, що виготовляються з них

Показано, що для виготовлення гарячекатаного спеціального профілю типу М1 з наступним виготовленням молотків дробарок найбільш раціональною є сталь 75Г2. Встановлено, що після гартування з низьким відпуском у робочій частині молотків зі сталі 75Г2 досягаються більше високі показники твердості (на 15%) і експлуатаційної стійкості (на 30%) у порівнянні з молотками зі сталі 65Г.