

Днепродзержинский государственный технический университет

## ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МОЛОТКОВ ДРОБИЛОК ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКОЙ

**Введение.** Наплавка – один из основных процессов реновации деталей, что позволяет экономить природные и энергетические ресурсы и значительно улучшить экологию. Одной из основных расходных статей для поддержки жизнедеятельности любого производства есть расходы, связанные с ремонтом машин и агрегатов, обеспечением их запасными деталями и узлами. В вопросе значительного уменьшения этих расходов большую роль играет технология восстановительной и упрочняющей электродуговой наплавки. Наплавка находит широкое применение как при изготовлении новых деталей, так и при ремонте тех, которые вышли из строя.

Экономическая эффективность наплавки следующая: наплавка одного килограмма металла при восстановлении заменяет изготовление 15-25 кг новых деталей, а при упрочнении – 60-75 кг; один килограмм наплавленного металла, восстанавливая или упрочняя в среднем 20 кг деталей, уменьшает расходы металла на изготовление новых деталей; после упрочняющей и восстановительной наплавки срок службы деталей увеличивается в 2-3 раза; одна гривня, вложенная в наплавку, позволяет получить экономию от 5 до 10 гривень. Кроме этого наплавка имеет природоохранное и ресурсосберегающее значение, поскольку использование 1 кг наплавленного материала позволяет сэкономить 70-100 кг агломерата, 20-30 кг кокса, 4-5 кВт электроэнергии и 6-8 м<sup>3</sup> природного газа [1, 2].

Черная металлургия наиболее реновационная отрасль как по фактическому объему восстанавливаемых деталей, так и по перспективе ее расширения. При выплавке чугуна в шихте, кроме руды, используют офлюсованный агломерат, для получения которого необходим известняк или известь. Для получения извести используют известняк и доломит, которые измельчают в молотковых дробилках для последующего обжига. Граница прочности известняка при сжатии в сухом состоянии – 60 МПа, а в водонасыщенном – 40-60 МПа.

К молотковым дробилкам относятся дробилки ударного действия с шарнирно закрепленными на роторе ударными элементами – молотками. Молотковые дробилки отличаются высокой степенью измельчения, которое достигает 100, а также малой массой и незначительной стоимостью 1 т материала, который измельчается. Производительность молотковых дробилок колеблется в значительных пределах – от 3 до 600 т/час. Молотковые дробилки состоят из следующих узлов: ротора с шарнирно подвешенными молотками, колосниковых решеток, корпуса и регулировочных устройств. Молотки являются главной частью дробилки. Выбор числа рядов и количества молотков определяется назначением дробилки. От числа рядов молотков зависит глубина проникновения дробимого материала в зону действия молотков и частота прохода молотков по колосниковой решетке.

Молотки классифицируют: по числу рабочих поверхностей – с одной, двумя и четырьмя; по диапазону колебаний – со свободными и ограниченными; по количеству деталей – сплошные, составные; по конструкционной форме – пластины, с утолщенной головкой, П-образные, кольцевые и др.

Конструкции молотков отличаются большим разнообразием, которое вызвано разными условиями работы дробилок и требованиями к их износостойкости [2].

Износостойкость материалов зависит от многих факторов: величины и характера нагрузки, твердости и прочности абразивов, свойств металлов, которые контактируют с агрессивной средой в условиях работы молотков и бил молотковых дробилок.

Измельчение пород высокой и средней прочности ведут раздавливанием, раскалыванием и ударом; помол – трением и ударом. Измельчение разделяют на крупное ( $D_{\max} = 1200-1500$  мм,  $d_{\max} = 100-300$  мм), среднее ( $D_{\max} = 100-300$  мм,  $d_{\max} = 30-100$  мм), мелкое ( $D_{\max} = 30-100$  мм,  $d_{\max} = 5-30$  мм), а помол – грубый ( $d_{\max} = 0,1-5$  мм), средний ( $d_{\max} = 0,05-0,1$  мм), тонкий ( $d_{\max} = 0,005-0,01$  мм) и сверхтонкий ( $d_{\max} = 0,001$  мм)[3].

**Постановка задачи.** Задача работы – выбор материалов для наплавки и повышение износостойкости молотков, бил дробилок, срока эксплуатации и качества измельчаемого известняка. В работе для наплавления молотков были использованы самозащитные порошковые проволоки ПП-У25Х17Т, ПП-АН170(Нп-80Х20Р3Т) и ВЕЛТЕК-Н.620(Нп-70Х5Г3М3С2ФР) диаметром 3,0-3,2 мм. Режим наплавки для разных проволок был следующим:

- а) проволока 3,2ПП-У25Х17Т:  $I_{зв} = 300-350$  А;  $U_{д} = 30$  В;  $V_{п.др} = 110-120$  м/ч;
- б) проволока 3,2ПП-АН170:  $I_{зв} = 300-350$  А;  $U_{д} = 30$  В;  $V_{п.др} = 110-120$  м/ч;
- в) проволока 3,0ВЕЛТЕК-Н.620:  $I_{зв} = 250-300$  А;  $U_{д} = 26$  В;  $V_{п.др} = 100-110$  м/ч.

Общая толщина наплавленных слоев металла – 20 мм. Многослойная наплавка иногда вызывает откалывание поверхности рабочего слоя и другие дефекты – волосяные трещины, поры. Общая масса одного молотка – 18 кг, время наплавки – 10-15 минут и объем наплавленного металла – 162-170 см<sup>3</sup>. Наплавленные молотки не поддавались термической обработке и были медленно охлаждены в песке.

Химический состав наплавленного на молотки металла разными проволоками приведен в табл.1.

Таблица 1 – Химический состав и твердость наплавленного металла

Марка проволоки	С	Mn	Si	Cr	Mo	V	мас. %
ПП-У25Х17Т	2,20-2,60	0,20-0,40	0,30-0,40	16-18	-	-	
ПП-АН170	1,80	0,60	0,35	18,80	-	-	
ВЕЛТЕК-Н.620	0,50-0,70	2,53	1,75	4,68	2,36	0,78	

Продолжение таблицы 1

Марка проволоки	В	Ti	S	P	Твердость, НРС	мас. %
ПП-У25Х17Т	-	0,80-1,10	$\leq 0,035$	$\leq 0,030$	47-50	
ПП-АН170	3,0	0,93	$\leq 0,035$	$\leq 0,030$	63-65	
ВЕЛТЕК-Н.620	0,95	-	$\leq 0,035$	$\leq 0,030$	64-66	

На предприятии раньше изготавливали кованные молотки из разных сталей, которые потом термически обрабатывали или наплавляли. Такая технология изготовления молотков была трудоемка и неэкономична.

В настоящее время для изготовления молотков дробилок ДРМИЗ-100 производительностью 100 т/год используют листовой прокат Ст50Г2, из которого изготавливается основа молотков и две пластины, которые накладываются и привариваются к основе, образуя молоток с утолщенной головкой. Готовые молотки проходят термообработку и имеют твердость 45-48 НРС.

Плановый срок работы молотков из термообработанной стали 50Г2 без замены – 720 часов, что равняется сроку их месячной эксплуатации.

Расход молотков из термообработанной стали 50Г2 в агломерационном цехе за один месяц работы 200 шт. Навеска молотков для одной дробилки ДРМИЗ-100 составляет 45 штук. Расход времени на навешивание молотков – 2,5-3 часа и на балансировку – 5-6 часов.

**Результаты работы.** При выполнении работы на вал молотковой дробилки типа ДРМИЗ-100 было установлено 36 молотков, изготовленных из термообработанной стали 50Г2, без наплавки и 9 молотков из Ст45 (по 3 молотка для каждой марки наплавоч-

ной проволоки), которые были наплавлены порошковыми проволоками ПП-У25Х17Т, ПП-АН170 и ВЕЛТЕК-Н.620.

При проведении исследований дробилка отработала 720 часы машинного времени и была остановлена для замены молотков, потому что начался некондиционный выход известняка. Схемы типов наплавленных молотков показаны на рис.1.

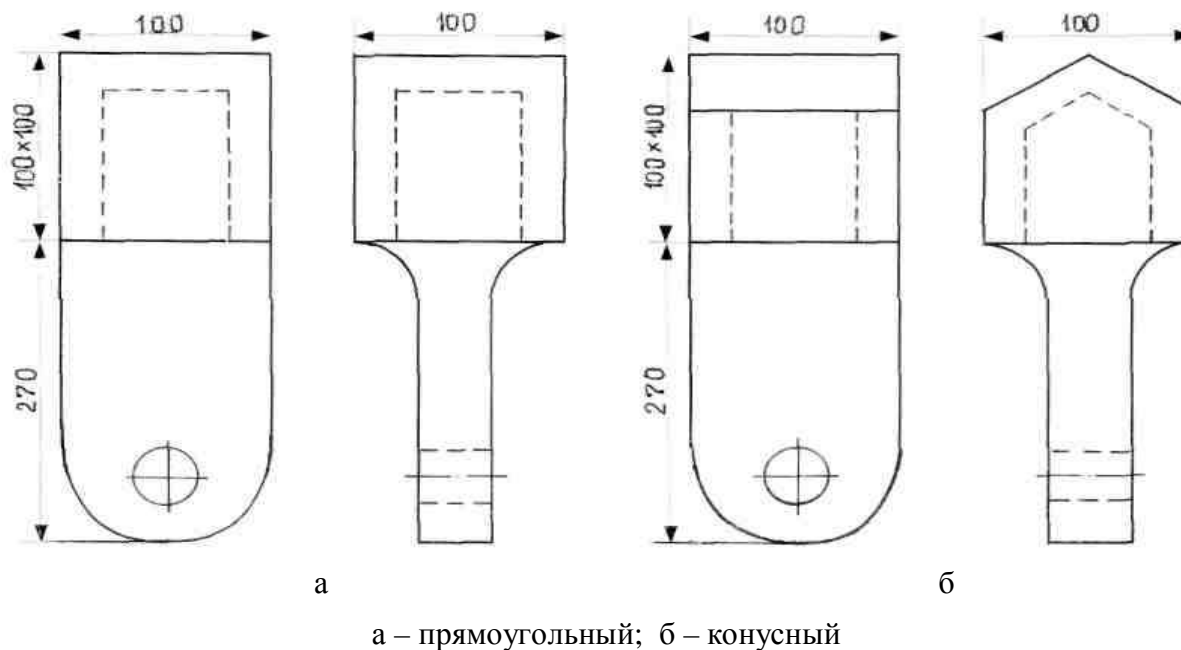


Рисунок 1 – Типы наплавленных молотков дробилки

Износ головок молотков из термоупрочненной Ст50Г2 составил 35-45%, а отверстий хвостовой части – 10-15%. Это приводит к значительному изменению granulometric composition and reduction of quality of limestone powder, which in practice is a sign of the need to replace hammers. In the mill, worn hammers from Ст50Г2 were replaced, and welded ones continued to work until acceptable wear, depending on the chemical composition and hardness of the welded metal. Average experimental results are given in table 2.

Таблица 2 – Результаты экспериментов

Материал молотков	Вид обработки и проволоки для наплавки	HRC	Потеря массы молотка за 720 ч, г/т	Потеря массы молотка, %	К <sub>о.из</sub>
Ст50Г2 эталон	Термообработка	45-48	5,913	40,52	1,0
Ст45	ППУ25Х17Т	47-50	3,196	21,90	1,85
	ПП-АН170	62-65	1,523	10,44	3,88
	ВЕЛТЕК-Н.620	62-66	0,910	6,24	6,50

Обработка результатов экспериментов показала, что износ термообработанной стали 50Г2 и наплавленных головок молотков проволоками различного химического состава за период испытания составил 6,0-1,0 г/т измельченного известняка при 720 часах работы дробилки, а увеличение коэффициента относительной износостойкости К<sub>о.из</sub> равнялось 1,0-6,5.

Фотографии изношенных накладных головок молотков из термоупрочненной Ст50Г2 показаны на рис.2.



Рисунок 2 – Вид изношенных накладных головок из термообработанной Ст50Г2

Относительная износостойкость термообработанной стали 50Г2 (эталон) и наплавленного металла проводами разного химического состава приведена на рис.3.

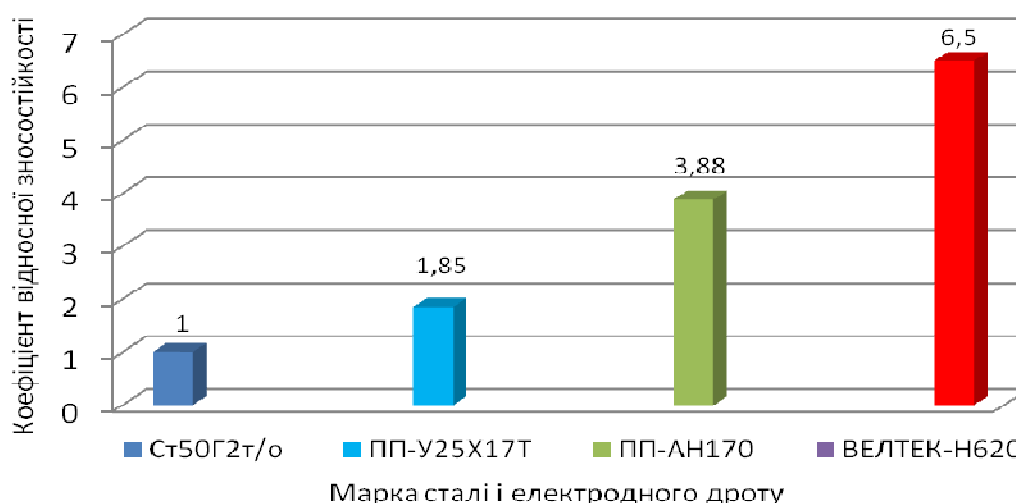


Рисунок 3 – Гистограмма относительной износостойкости наплавленного металла

Из табл.2 и рис.3 видно, что наибольшую износостойкость имеют молотки, наплавленные порошковыми проволоками ПП-АН170 и ВЕЛТЕК-Н.620, которые относятся к системам наплавки Fe-C-Cr-V-Ti і Fe-C-Cr-Mo-V-B.

Полученное уравнение полиномиальной аппроксимации изменения износостойкости следующее:

$$y = 0,4425x^2 + 0,3595x + 0,8875; \quad R^2 = 0,9990.$$

Разработка математической модели выполнялась на основе планирования эксперимента для трех независимых переменных на двух уровнях варьирования.

Выбор уровней и интервалов варьирования легирующих элементов был сделан на основе химического состава проволоки и твердости наплавленного металла.

С целью нахождения функциональных связей между независимыми факторами ( $x_1, x_2, x_3$ ) и параметрами оптимизации (HRC,  $K_{0,из}$ ) использовали методику регрессионного анализа для многофакторных планов [5]. Был реализован полный факторный эксперимент типа  $N=2^3$ , который включал восемь основных экспериментов.

Математическая модель подбиралась последовательно, начиная от линейного уравнения до получения высоких показателей коэффициентов корреляции.

Уровни и интервалы варьирования при наплавке валиков на образцы различными проволоками приведены в табл.3, 4.

Таблица 3 – Уровни и интервалы варьирования

Показатель	ПП-У25Х17Т			ПП-АН170			
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>3</sub>
	C, %	Cr, %	Ti, %	C, %	Cr, %	Ti, %	B, %
Верхний уровень (+1)	3.0	18	1.0	1,0	20	1,0	4,0
Нулевой уровень (0)	2.5	17	0.80	0,80	18	0,80	3,0
Нижний уровень (-1)	2.0	16	0.60	0,60	16	0,60	2,0
Интервал варьирования (i)	0.5	1	0.20	0,20	2	0,20	1,0

Таблица 4 – Уровни и интервалы варьирования

Показатель	ВЕЛТЕК-Н620		
	X <sub>1</sub> - C, %	X <sub>2</sub> - Cr, %	X <sub>3</sub> - B, %
Верхний уровень (+1)	1,0	7	1,20
Нулевой уровень (0)	0,70	5	1,0
Нижний уровень (-1)	0,40	3	0,80
Интервал варьирования (i)	0,30	2	0,20

Матрица планирования и результаты экспериментов приведены в табл.5.

Таблица 5 – Матрица планирования и результаты экспериментов

№*	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	ПП-У25Х17Т		ПП-АН170		ВЕЛТЕК-Н620	
	C, %	Cr, %	Ti, B, %	HRC	K <sub>0.из</sub>	HRC	K <sub>0.из</sub>	HRC	K <sub>0.из</sub>
7	-	-	-	48	1,84	68	3,94	67	6,48
16	+	-	-	50	1,87	66	3,83	70	6,52
3	-	+	-	52	1,88	67	3,86	66	6,46
6	+	+	-	50	1,86	67	3,84	68	6,50
20	-	-	+	46	1,82	68	3,85	66	6,45
11	+	-	+	51	1,87	66	3,82	68	6,51
15	-	+	+	47	1,83	68	3,95	70	6,53
1	+	+	+	45	1,81	67	3,85	71	6,55

\* № рандомизированных опытов

Обработка экспериментальных данных выполнялась с помощью регрессионного анализа и программного комплекса "Statistica". Получена линейная регрессионная модель, которая характеризует влияние химического состава наплавленного металла на физико-химические и эксплуатационные свойства сплавов системы Fe-C-Cr-Ti и Fe-C-Cr-Mo-V-B.

Регрессионные уравнения для расчетов следующие.

Молотки, наплавленные проволокой ПП-У25Х17Т:

$$\begin{aligned} \text{HRC} &= 41 + 0,548 \cdot C + 0,186 \cdot \text{Cr} + 1,875 \cdot \text{Ti}; \\ K_{\text{в.зн}} &= 1,64 + 0,014 \cdot C + 0,008 \cdot \text{Cr} + 0,056 \cdot \text{Ti}. \end{aligned}$$

Молотки, наплавленные проволокой ПП-АН170:

$$\text{HRC} = 53 - 2,28 \cdot C + 0,819 \cdot \text{Cr} + 0,091 \cdot \text{B};$$

$$K_{в.зн} = 4,27 - 0,076 \cdot C - 0,015 \cdot Cr - 0,021 \cdot B;$$

$$HRC = 53 - 2,28 \cdot C + 0,819 \cdot Cr + 0,455 \cdot Ti;$$

$$K_{в.зн} = 4,11 - 0,076 \cdot C + 0,015 \cdot Cr + 0,103 \cdot Ti.$$

Молотки, наплавленные проволокой ВЕЛТЕК-Н.620:

$$HRC = 64 + 2,433 \cdot C + 0,183 \cdot Cr + 0,183 \cdot B;$$

$$K_{в.зн} = 6,47 + 0,024 \cdot C + 0,003 \cdot Cr + 0,006 \cdot B.$$

Анализ адекватности полученной модели оценивался при  $\alpha = 0,05$  по критерию Фишера, который был меньше табличных значений, а проверка значимости коэффициентов регрессии – по t-критерию Стьюдента. Значение коэффициентов детерминации  $R^2$  равнялось 0,8595-0,8947. Полученные результаты свидетельствуют об адекватности модели и возможности ее использования.

**Выводы.** 1. Установлено, что наибольший коэффициент относительной износостойкости  $K_{о.из} = 6,50$  имеют молотки дробилки, которые наплавлены самозащитной порошковой проволокой ВЕЛТЕК-Н.620, у которых выше физико-механические, технологические и эксплуатационные показатели, чем у молотков, наплавленных проволоками ПП-У25Х17Т и ПП-АН170.

2. Износ молотков из термообработанной стали 50Г2 за 720 часов работы составлял 5,913 г/т известняка, а наплавленных проволоками ПП-У25Х17Т – 3,196, ПП-АН170 – 1,523 и ВЕЛТЕК-Н.620 – 0,910 г/т.

3. Срок эксплуатации молотков, наплавленных проволоками ПП-У25Х17Т, ПП-АН170 и ВЕЛТЕК-Н.620 выше, чем у молотков из термообработанной стали 50Г2 в 2-3,5 раза.

4. Использование полученной математической модели позволяет прогнозировать твердость и износостойкость наплавленных молотков дробилок в зависимости от химического состава металла.

5. Для повышения технологической и эксплуатационной прочности молотков дробилок, снижения трудоемкости и себестоимости целесообразно изготовление молотков из готовых, наплавленных необходимыми износостойкими материалами пластин листового проката [6].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рябцев И.А. Реновационные наплавочные технологии в металлургии и машиностроении / И.А.Рябцев, Ю.М.Кусков, Н.А.Кондратьев // Металлургия машиностроения. – 2003. – № 1. – С.11-14.
2. Клушанцев Б.В. Дробилки. Конструкция, расчёт, особенности эксплуатации / Б.В.Клушанцев, А.И.Косарев, Ю.А.Муйземнек. – М.: Машиностроение, 1990. – 320с.
3. Виноградов В.Н. Абразивное изнашивание / В.Н.Виноградов, Г.М.Сорокин, М.Г.Колокольников. – М.: Машиностроение, 1990. – 221с.
4. Попов С.Н. Оптимизация износостойкого наплавочного сплава системы Fe-C-Ti-B для условий изнашивания закрепленным абразивом / Попов С.Н., Антонюк А.Д. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2009. – № 1. – С.93-99.
5. Ольшанецкий В.Е. О физических подходах к математическому моделированию функциональных связей / Ольшанецкий В.Е. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2003. – № 1. – С.80-86.
6. Жудра А.П. Оборудование и материалы для износостойкой наплавки листовых футеровочных элементов / А.П.Жудра, А.П.Ворончук, С.И.Великий // Автоматическая сварка. – 2009. – № 9. – С.53-55.

Поступила в редколлегию 11.01.2013.