

УДК 621.926.3/8

*к.т.н. Ульяницкий В. Н.,  
к.т.н. Петров П. А.,  
к.э.н. Ульяницкая О. В.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР),  
д.т.н. Еронько С. П.  
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)*

## ОЦЕНКА ИЗНОСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОЧИХ ИНСТРУМЕНТОВ ВАЛКОВО-ТАРЕЛЬЧАТЫХ МЕЛЬНИЦ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

*В статье рассмотрены вопросы комплексной оценки показателей износных характеристик (параметров) рабочих инструментов — бандажей и сегментов — мельниц для приготовления пылеугольного топлива.*

*Ключевые слова:* мельница, размольный валок, размольный стол, бандаж, сегмент, износ, пылеугольное топливо.

Высокие энергетические затраты в металлургическом производстве обусловили поиск направлений снижения потребления дорогостоящих природного газа и кокса в доменной плавке [1, 2]. Многочисленные научные исследования и производственный опыт сошлись во мнении, что на данном этапе развития доменного производства наиболее эффективным альтернативным энергоносителем является пылеугольное топливо (ПУТ) [3, 4]. Для приготовления ПУТ используют измельчительные устройства нескольких типов и конструктивных конфигураций, получивших объединяющее название — валковые мельницы. Принципиальное их отличие заключается в кинематике силовой цепи главного привода, числе и геометрической форме измельчающих элементов машины [5, 6].

Однако процесс измельчения углей лубой из мельниц осуществляется одинаково — путём раздавливания и частичного истирания размольными инструментами.

Важнейшей эксплуатационной характеристикой углеразмольных установок является величина износа рабочей поверхности размольного инструмента — валков и столов. У большинства современных мельниц измельчительные элементы имеют сборную конструкцию: валки бандажированные, а столы

сегментированные. Именно бандажи валков и сегменты стола соприкасаются с измельчаемым материалом. Их рабочие поверхности изнашиваются, и при достижении нормативной величины износа бандажи и сегменты комплектно извлекаются из мельницы для реновации или отправки в металлолом.

Длительность рабочей компании размалывающих элементов валковых мельниц зависит от нескольких факторов, главными из которых являются абразивные свойства измельчаемого материала (в нашем случае углей) и противоизносные характеристики металла бандажей и сегментов [7]. По данным [8] наибольшую относительную износостойкость имеют легированные стали с повышенной твёрдостью. Проверка этого положения на различных сплавах и сталях [9] подтвердила, что зависимость относительной износостойкости от твёрдости сплава имеет прямолинейный характер.

Кроме того, на условия работы мельниц оказывают влияние неоднородности качества углей, исходная сегрегация и влажность, тонина (тонкость) помола ПУТ, обуславливающая надёжное зажигание и полное сгорание его в факеле на выходе из фурмы доменной печи.

Знание износных характеристик (интенсивность износа и его абсолютная величина

на) позволяет обслуживающему персоналу комплекса приготовления ПУТ установить оптимальный режим работы мельницы, определиться с периодичностью диагностирования (замеров) износа рабочих поверхностей измельчающего инструмента, снизить эксплуатационные расходы по замене изношенных бандажей и сегментов.

Целью статьи является определение износных характеристик рабочего инструмента вертикальных валково-тарельчатых мельниц MPS 3070 ВК и MPS 3550 ВК, приобретённых ПАО «Алчевский металлургический комбинат» у немецкой фирмы-изготовителя Pfeiffer AG (г. Кайзерслаутерн).

В этих мельницах приводными являются столы, чем обусловлена более простая кинематика главного привода машины. Мелющие холостые валки вращаются вокруг своих горизонтальных осей за счёт приводного усилия от стола через посредство измельчаемого угля. Три стационарных мелющих валка перемещаются в рабочей желобчатой поверхности медленно движущегося помольного стола. Положение валков на столе мельницы представлено на рисунках 1 и 2.

Как уже отмечалось, бандажи валков и сегменты стола, как наиболее изнашиваемые детали размольных элементов мельницы, выполнены съёмными.

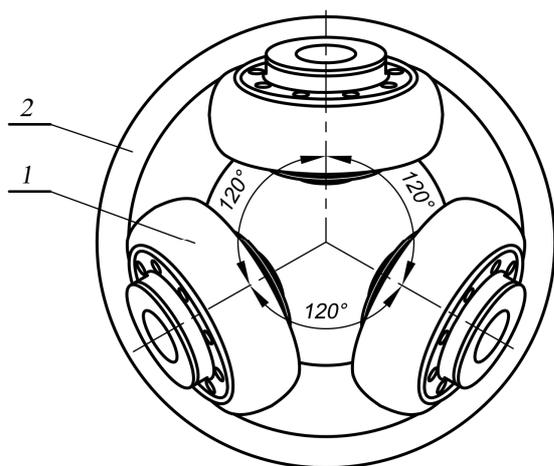


Рисунок 1 Схема расположения измельчающих элементов машины:  
1 — размольный валок; 2 — размольная плита (стол)

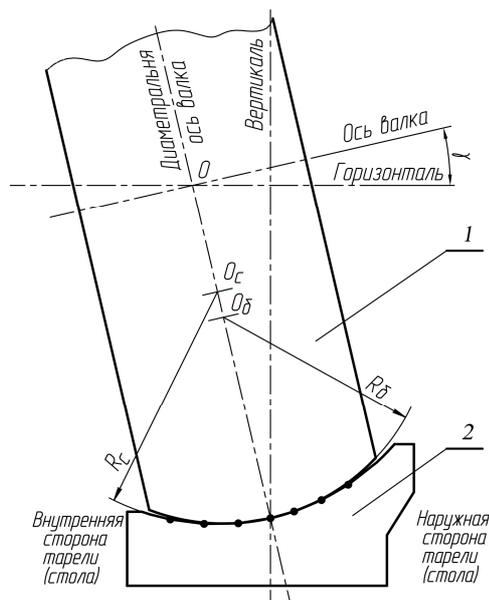


Рисунок 2 Схема расположения контактных рабочих поверхностей банджа валка (1) и сегмента стола (2) мельницы:

$R_b$ ,  $R_c$  — конструктивные радиусы образующих рабочих поверхностей банджа и сегмента;  $\gamma$  — угол наклона оси валка относительно горизонтали перед запуском мельницы в работу

Этим обеспечивается доступность комплектной их замены новыми или отправки на восстановление.

Бандажи и сегменты изготовлены способом литья из легированного износостойкого высокохромистого чугуна марки 300Cr15Mo3, химический состав которого представлен в таблице 1.

Корпус валка, на который насаживается бандаж, изготовлен из конструкционной стали.

Соединение банджа с корпусом валка осуществляется клеммовым креплением. Сегменты (а их 13 по окружности стола) располагаются в кольцевом гнезде и закрепляются клеммовым соединением.

Конструкции банджа и сегмента мельницы MPS 3070 ВК приведены на рисунках 3 и 4.

К числу износных характеристик относят потерю собственного веса рабочим органом мельницы в процессе измельчения материала.

Таблица 1

Химический состав материала мелющих элементов бандажей и сегментов

Наименование химического элемента	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	S	P
Содержание, %	2,62	0,89	0,25	15,6	2,41	0,65	0,057	0,017	0,011

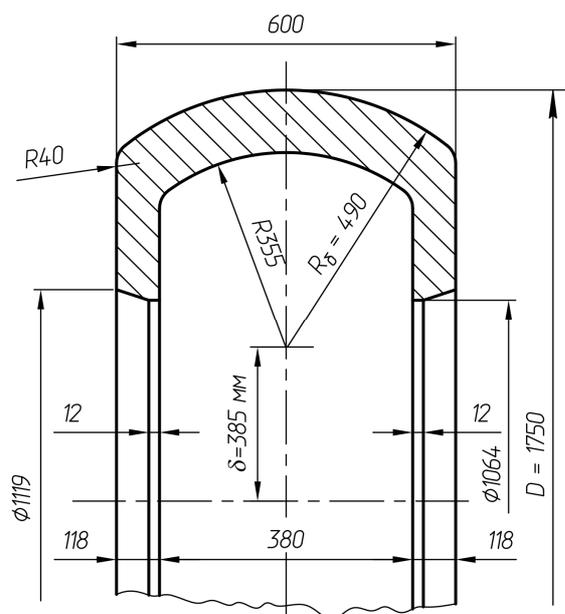


Рисунок 3 Конструкция бандажя размольного вала

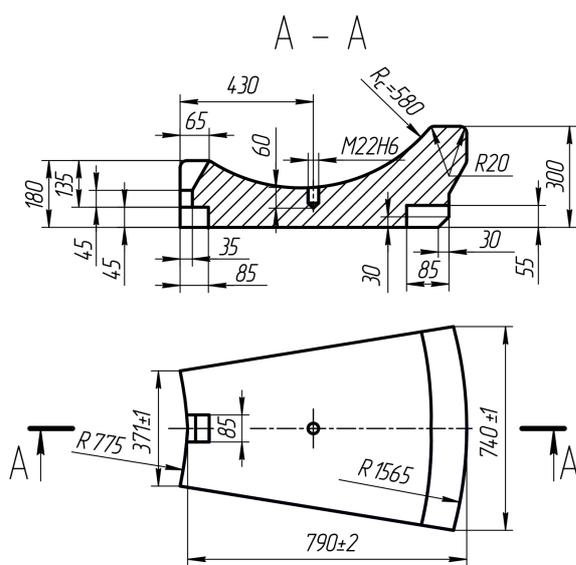


Рисунок 4 Конструкция сегмента размольного стола

Для определения показателя потери веса бандажями и сегментами мельницы MPS 3070 ВК в условиях ПАО «АМК» воспользовались двумя методами.

Первый — достаточно простой и точный — это взвешивание инструмента после вывода из эксплуатации на замену новым или реставрацию. Демонтированные бандажы и сегменты подвергались тщательной очистке от остатков пылеугольной среды, обрабатывались подогретым сжатым воздухом и взвешивались на электронных весах участка весового хозяйства комбината. Результаты такого исследования представлены в таблице 2.

Первоначальный вес штатных новых инструментов составлял: бандажя — 4100 кг, сегмента — 545 кг. Собственно, после измельчения 196 тыс. т угольной массы вес бандажя составил 3500 кг, а сегмента — 429,6 кг. Таким образом, абсолютный износный показатель (потеря веса) составил: бандажя — 600 кг (14,6 % первоначального веса), сегмента — 115,4 кг (21,2 %), суммарный показатель всех (3 бандажей и 13 сегментов) рабочих элементов достиг 3300 кг (17,0 %).

Из относительных показателей износа наиболее информативным является потеря веса инструмента относительно количества (массы) обработанного угля. Для удобства сравнения принято пользоваться размерностью кг/тыс. т.

Относительный показатель позволяет эксплуатационной службе, имея базу накопленных данных, диагностировать (контролировать) техническое состояние рабочих элементов и намечать сроки вывода дефектных бандажей и сегментов мельницы на реставрацию.

Таблица 2

Показатели измерения износа (мм) в контрольных точках бандажа и сегмента

Время эксплуатации с момента пуска, часов	Измельчено угольной шихты, тыс. т	Износные показатели				
		Первоначальный вес нового изделия, кг	Абсолютная износная потеря веса, кг	Относительные потери		
				относительно первоначального веса, кг/кг	относительно массы измельчённого угля, кг/тыс. т	за час эксплуатации, кг/час
4387	196	Бандажи валков				
		4100*	600	0,146	3,06	0,137
		12300**	1800		9,18	0,410
		Сегменты стола				
		545*	115,4	0,212	0,588	0,026
		7085**	1500,2		7,644	0,342
		Суммарные (бандажей и сегментов) показатели				
		19385	3300,2	0,170	16,824	0,752

\* — показатель одного изделия

\*\* — показатель комплекта изделий в машине

Временной показатель потери веса (кг/час) недостаточно информативен, поскольку продолжительность работы мельницы, из-за возможных непредвиденных обстоятельств, меньше календарного времени.

Обслуживающему персоналу желательно иметь возможность определять износный показатель по потере веса в любой момент эксплуатационного периода.

В этом случае уместен аналитический метод, позволяющий по данным замера абсолютного износа в контрольных точках на маркировочных линиях рассчитывать все составляющие износных характеристик: площадь износа, объём изношенной части инструмента, а по нему — потерю веса бандажом и сегментом.

Известные предельные потери веса обуславливают полные издержки восстановления изношенных поверхностей рабочего инструмента (если оно экономически обосновано) и влияют на эксплуатационные показатели мельницы.

В качестве примера рассмотрим аналитические зависимости, определяющие износные характеристики бандажа размольного валка.

Потерю веса  $G_{\text{ин}}$  рабочим инструментом при износе определяем по формуле

$$G_{\text{ин}} = V_{\text{ин}} \cdot \rho, \quad (1)$$

где  $V_{\text{ин}}$  — объём изношенной части;

$\rho$  — объёмная масса металла размольного инструмента.

Величину объёма изношенной части находим по зависимости

$$V_{\text{ин}} = S_{\text{ин}} \cdot h_{\text{ин}}, \quad (2)$$

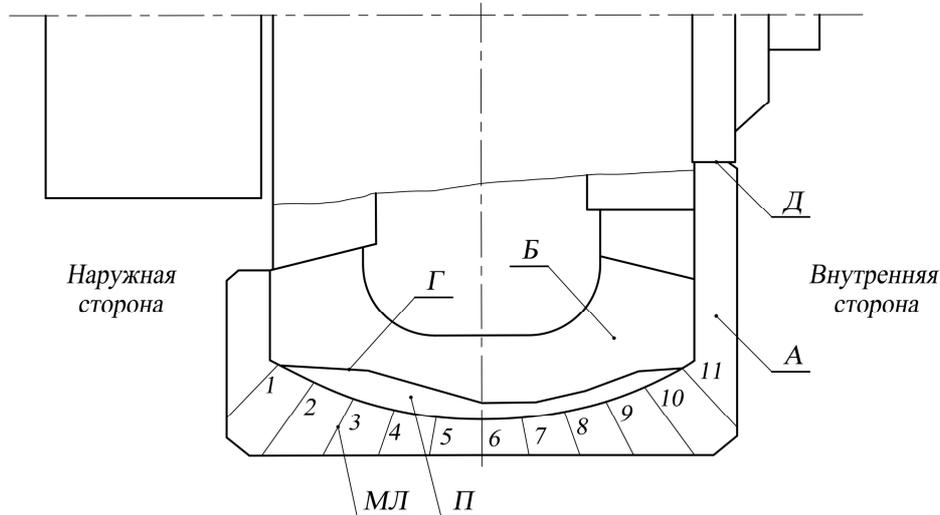
где  $S_{\text{ин}}$  — площадь износа рабочей поверхности бандажа в радиальном сечении;

$h_{\text{ин}}$  — длина (протяжённость) износа рабочей части бандажа в окружном направлении. Для нашего случая — длина окружности, проходящая через центр тяжести площади износа.

Для определения величины  $S_{\text{ин}}$  применим графоаналитический метод, поскольку строго теоретически рассчитать площадь износа бандажа с достаточной точностью затруднительно из-за её близкой к серповидности формы.

На основании данных замеров радиального износа в контрольных точках на маркировочных линиях (МЛ) с помощью шаблона (рис. 5) выполнено графическое изображение границы фронта износа рабочей поверхности бандажа.

Получение достоверных расчётных показателей обусловило необходимость выполнить графическое изображение поверхности износа на миллиметровой бумаге в масштабе 1:1. Для наглядности уменьшенная копия дана на рисунке 6.



А — шаблон; Б — бандаж; Г — граница износа; ПК — проектный контур рабочей поверхности бандажа; П — площадь износа; МЛ — маркировочная линия; Д — упор для шаблона; 1, 2, 3 ... 11 — контрольные точки замера радиального износа на МЛ

Рисунок 5 Схема измерения износа рабочей поверхности бандажа мелющего вала с помощью шаблона

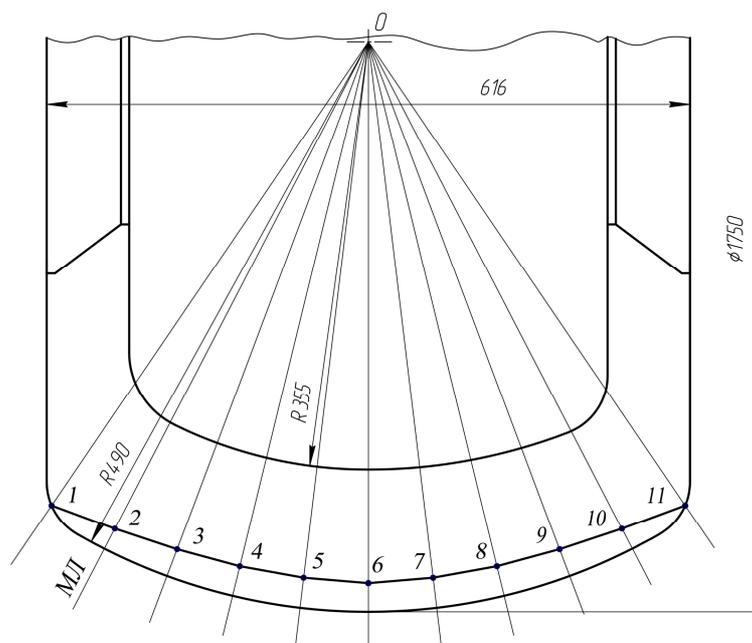


Рисунок 6 Графическое построение радиального износа рабочей поверхности бандажей: МЛ — маркировочные линии; 1, 2, 3 ... 11 — контрольные точки

Далее поверхность износа разбивалась между маркировочными линиями на 10 элементарных участков, 8 из которых по форме близки к прямоугольнику или трапеции, концевые — к треугольнику (рис. 6).

Площадь износа рабочей поверхности с внешней стороны бандажа ограничена контуром проектной кривой радиуса  $R$ , а граница глубины ( $\Gamma$ ) износа — некоторой слегка волнообразной линией, характеризующейся неравномерностью износа, зафиксированного в контрольных точках. Результаты замера величины абсолютного радиального износа рабочей поверхности бандажа перед его заменой занесены в таблицу 3.

Для расчёта площади износа элементарного участка (рис. 7) приняли его форму близкой к трапеции, в которой нижнее основание обозначено  $l_{n_i}$ , верхнее —  $l_{b_i}$ , боковые стороны —  $\Delta R_i$  и  $\Delta R_{i+1}$  ( $\Delta R_{i-1}$ ). В соответствии с графическим построением  $l_{n_i}$  представляет собой дугу длиной  $\approx 70$  мм для всех участков. На формирование величины  $l_{b_i}$  оказывают влияние соседние показатели износа  $\Delta R_i$  и  $\Delta R_{i+1}$  ( $\Delta R_{i-1}$ ), являющиеся боковыми сторонами трапеции (рис. 7). Величина угла  $\beta \approx 10^\circ$  обусловлена расположением маркировочных линий на шаблоне.

Принятое допущение замены фактической формы площади элементарного участка близким к трапеции вносит незначительную погрешность в результаты расчёта, о чём свидетельствует сопоставление величин, определённых экспериментально, и расчётных (см. табл. 4).

Расчёт площади износа элементарного участка выполнен по формуле:

для трапеции

$$S_i = \frac{l_{n_i} + l_{b_i}}{2} \cdot \frac{\Delta R_i + \Delta R_{i+1}}{2}, \quad (3)$$

для треугольника

$$S_i = \frac{1}{2} l_{b_i} \cdot \Delta R_i. \quad (4)$$

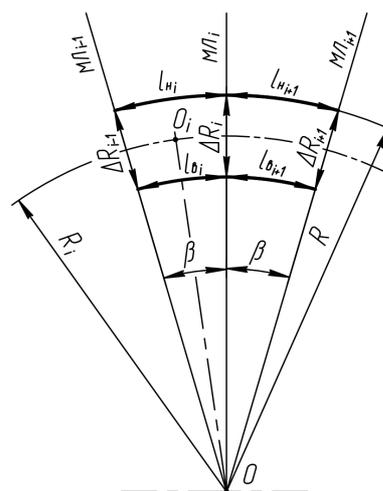
Объём износа элементарного участка бандажа представляет собой кольцевую фигуру и определяется по формуле

$$V_i = S_i \cdot C_i, \quad (5)$$

где  $V_i$  — объём износа  $i$ -го участка,  $\text{мм}^3$ ;

$S_i$  — величина площади износа  $i$ -го участка,  $\text{мм}^2$ ;

$C_i$  — длина окружности центра тяжести площади  $i$ -го элементарного участка.



$O_i$  — центр тяжести площади элементарного участка;  $R_i$  — радиус положения точки  $O_i$  относительно точки  $O$

Рисунок 7 Схема выделенного элементарного участка изношенной поверхности бандажа

Таблица 3

Данные замера радиального износа бандажа вала

Время эксплуатации с момента запуска в работу, часов	Измельчено, тыс. тонн	Радиальный износ бандажа, $\Delta R_i$ , мм										
		Номера контрольных точек на маркировочных линиях										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4387	196	0	11	17	23	27	30	27	18	15	12	0

В соответствии с построением  $C_i$  является длиной окружности, проходящей через центр тяжести  $O_i$  элементарной площади износа (см. рис. 7):  $C_i = \pi \cdot D_i$ , где  $D_i$  — диаметр окружности  $C_i$  по точке  $O_i$ .

С учётом конструктивных параметров бандажа диаметр окружности  $D_i$  составит (см. рисунки 7 и 3)

$$D_i = 2R_i + 2\delta. \quad (6)$$

Тогда

$$C_i = 2\pi(R_i + \delta). \quad (7)$$

С учётом формул (3), (4), (7) получим объёмы  $i$ -тых колец, имеющих сечение:

трапециевидных площадок износа

$$V_i = \left( \frac{ln_i + l\vartheta_i}{2} \cdot \frac{\Delta R_i + \Delta R_{i+1}}{2} \right) \cdot 2\pi(R_i + \delta); \quad (8)$$

концевых (треугольных) площадок износа

$$V_i = l\vartheta_i \cdot \Delta R_i \cdot \pi(R_i + \delta). \quad (9)$$

Определяем потери веса по формуле

$$G_i = V_i \cdot \rho. \quad (10)$$

Обычно для чёрных металлов объёмная масса  $\rho = 7500 \dots 8750 \text{ кг/м}^3$ , в расчётах принимали  $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$ .

Достоверность полученных характеристик износа зависит от точности замера радиального износа рабочей поверхности бандажа с помощью шаблона и точности графоаналитического метода определения площади износа бандажа.

Для большей достоверности полученных результатов оценки износных характеристик бандажа, величину элементарных площадок радиального износа (см. рис. 7) замеряли с помощью планиметра полярного модели ПП-2к.

Данные величин износа рабочей поверхности бандажа валково-тарельчатой мельницы MPS 3070 ВК по десяти ( $n=10$ ) элементарным участкам, полученные аналитическим расчётом и с помощью планиметра, представлены в таблице 4.

В аналитических расчётах использованы геометрические параметры конструкции бандажа:  $D=1750 \text{ мм}$ ,  $R_\delta=490 \text{ мм}$ ,  $\delta=385 \text{ мм}$  (см. рис. 3).

Таблица 4

Данные экспериментальных ( $\Delta R_i$ ,  $R_i$ ,  $ln_i$ ,  $l\vartheta_i$ ,  $S_{\text{пн}}$ ) и расчетных ( $D_i$ ,  $C_i$ ,  $S_i$ ,  $V_i$ ,  $G_i$ ) величин износа рабочей поверхности бандажа валково-тарельчатой мельницы MPS 3070 ВК

$n$	$\Delta R_i$	$R_i$	$ln_i$	$l\vartheta_i$	$S_i$	$D_i$	$C_i$	$S_i$	$V_i$ $\times 10^6$	$G_i$	$\frac{(S_i - S_{\text{пн}})}{S_{\text{пн}}}$
—	мм	мм	мм	мм	мм <sup>2</sup>	мм	мм	мм <sup>2</sup>	мм <sup>3</sup>	кг	%
1	11	479	0	63	679	1749	5492	698,25	3,84	30,1	2,84
2	17	473	70	68	1053	1742	5470	966	5,28	41,49	-8,26
3	23	467	70	67	1444	1730	5433	1370	7,44	58,43	-5,12
4	27	463	70	65	1738	1720	5400	1687,5	9,11	71,54	-2,91
5	30	460	70	64	1994	1713	5379	1909,5	10,3	80,63	-4,24
6	27	463	70	64	1980	1713	5379	1909,5	10,3	80,62	-3,56
7	18	472	70	67	1660	1725	5417	1581,25	8,35	65,53	-4,74
8	15	475	70	67	1292	1735	5448	1198,75	6,53	51,27	-7,22
9	12	480	70	68	1018	1745	5479	962,5	4,73	37,1	-5,45
10	10	480	0	68	628	1743	5498	631,75	3,47	27,26	0,60
					13486			12915		543,98	

■ — экспериментальные,

□ — расчётные значения

Сопоставительный анализ данных таблицы 4 свидетельствует о том, что величины площади износа рабочей поверхности бандажа в радиальном сечении, полученные аналитическим расчётом на основе графоаналитического метода и измеренные планиметром, отличаются в среднем на 4,5 %. Разброс граничных показателей по всем десяти элементарным участкам составил пределы 0,6...8,26 %. Величина суммарной площади износа, соответственно, составила:  $S_i=12915 \text{ мм}^2$ ,  $S_{\text{ип}}=13486 \text{ мм}^2$ , т. е. результат, измеренный планиметром, на 4,2 % более достоверен.

Однако использование в практических целях способа измерения площади износа планиметром маловероятно. Благодаря своей более высокой достоверности он применим в экспериментальном исследовании, когда требуется системный анализ факторов и показателей, обуславливающих процесс изнашивания рабочего инструмента. Для механослужбы участка приготовления ПУТ целесообразно использовать графоаналитический метод определения изношенных характеристик бандажа валка мельницы.

#### Выводы.

1. Основными факторами, обуславливающими износ рабочих поверхностей

бандажей и сегментов мельниц, являются: абразивные свойства измельчаемых углей, исходные размеры (кусковатость) шихты и конечного продукта (тонина помола), механические параметры материала мелющих инструментов, количество переработанной угольной массы.

2. Исследование методов оценки изношенных характеристик бандажей валка и сегментов стола даёт основание использовать наиболее доступный для механослужбы способ ориентировочного контроля состояния рабочей поверхности — устанавливать величину износа по количеству измельчённого угля за определённый период работы мельницы. Такой приём удобен тем, что не требует остановки машины для снятия показаний на маркировочных линиях и уменьшает риск внеплановых простоев оборудования.

3. Контрольные измерения необходимы только тогда, когда показатель износа по количеству тонн измельчённого угля приблизиться к предельно допустимой величине — 70 мм, установленной изготовителем мельницы. В этом случае будет приниматься решение о возможности дальнейшей эксплуатации рабочих инструментов или вывода их в реставрацию.

#### Библиографический список

1. Мороз, А. Я. Использование энергоносителей в производстве продукции на металлургических и коксохимических предприятиях Донецкой области в 2011 году [Текст] / А. Я. Мороз, И. Т. Резниченко, С. Н. Тупилко // Металлургические процессы и оборудование. — Донецк, 2012. — № 1 — С. 12–16.
2. Новохатский, А. М. Проблемы замены кокса альтернативными видами топлива и пути их решения [Текст] : монография / А. М. Новохатский, А. В. Карпов. — Алчевск : ДонГТУ, 2013. — 182 с.
3. Alternate Carbon Sources for Sintering of Iron Ore (Acasos) / Roland Pietruck [ets]. — Luxembourg Office of the European Union, 2013. — 71 p.
4. Ульяницкий, В. Н. Особенности эксплуатации валковых мельниц для приготовления пылеугольного топлива [Текст] / В. Н. Ульяницкий, П. А. Петров, О. В. Ульяницкая, Р. Ю. Коробов // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2017. — № 7 (50). — С. 146–152.
5. ГОСТ Р 55853–2013. Мельницы валковые среднеходные. Типы, основные параметры, технические требования [Текст]. — Введ. 2013-22-11. — М. : Стандартинформ, 2014. — 13 с.
6. Ульяницкий, В. Н. Анализ конструктивных особенностей и функциональных возможностей мельниц для приготовления пылеугольного топлива [Текст] / В. Н. Ульяницкий, А. М. Новохатский, П. А. Петров // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2018. — № 9 (52). — С. 105–114.

7. Клушанцев, Б. В. Дробилки. Конструкция, расчёт, особенности эксплуатации [Текст] / Б. В. Клушанцев, А. И. Косарев, Ю. А. Муйземнек. — М. : Машиностроение, 1990. — 320 с. : ил.
8. Хрущов, М. М. Исследование изнашивания металлов [Текст] / М. М. Хрущов, М. А. Бабичев. — М. : Изд-во АН СССР, 1960. — 352 с.
9. Волковинский, В. А. Мельницы-вентиляторы [Текст] / В. А. Волковинский, К. Ф. Роддатис, А. А. Харламов ; под общ. ред. проф. К. Ф. Роддатиса. — М. : Энергия, 1971. — 288 с.

© Ульяницкий В. Н.© Петров П. А.© Ульяницкая О. В.© Еронько С. П.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Харламовым Ю. А., д.т.н., проф. каф. ГиПТ ЛНУ им. В. Даля Замота Т. Н.*

*Статья поступила в редакцию 11.01.19.*

**к.т.н. Ульяницкий В. Н., к.т.н. Петров П. О., к.е.н. Ульяницкая О. В. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР), д.т.н. Еронько С. П. (ДонНТУ, м. Донецьк, ДНР)**

#### **ОЦІНКА ЗНОСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РОБОЧИХ ІНСТРУМЕНТІВ ВАЛКОВО-ТАРІЛЧАСТИХ МЛІНІВ ДЛЯ ПРИГОТУВАННЯ ПИЛОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА**

*У статті розглянуто питання комплексної оцінки показників зносних характеристик (параметрів) робочих інструментів — бандажів і сегментів — млинів для приготування пиловугільного палива.*

**Ключові слова:** млин, розмольний валок, розмольний стіл, бандаж, сегмент, знос, пиловугільне паливо.

**PhD Ulianitskiy V. N., PhD Petrov P. A., PhD Ulianitskaia O. V. (DonSTU, Alchevsk, LPR), Doctor of Tech. Sc. Eron'ko S. P. (DonNTU, Donetsk, DPR)**

#### **ASSESSMENT OF WEAR CHARACTERISTICS OF OPERATING TOOLS OF THE ROLLER-PLATE MILLS FOR THE PULVERIZED COAL FUEL PREPARATION**

*The article deals with the issues of a full assessment of indicators of wear characteristics (parameters) of operating tools — sleeves and segments — mills for the pulverized coal preparation.*

**Key words:** mill, grinding roll, grinding table, sleeve, segment, wear, pulverized coal fuel.