

УДК 621.926.3/8

*к.т.н. Ульяницкий В. Н.,
д.т.н. Новохатский А. М.,
Петров П. А.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)*

АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЕЛЬНИЦ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

В статье рассмотрены вопросы комплексного исследования конструктивных особенностей и факторов, обуславливающих износные характеристики рабочего инструмента мельниц приготовления пылеугольного топлива для доменных печей.

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

Совершенствование и дальнейшее развитие металлургического производства обусловлено жёсткой конкуренцией на мировом рынке металлов. Перед металлургами, учёными и практиками стоит задача нахождения путей снижения использования дорогостоящих высококалорийных (природный газ, кокс, нефтепродукты) энергоресурсов, обуславливающих себестоимость и, в конечном итоге, цену реализации товарной продукции.

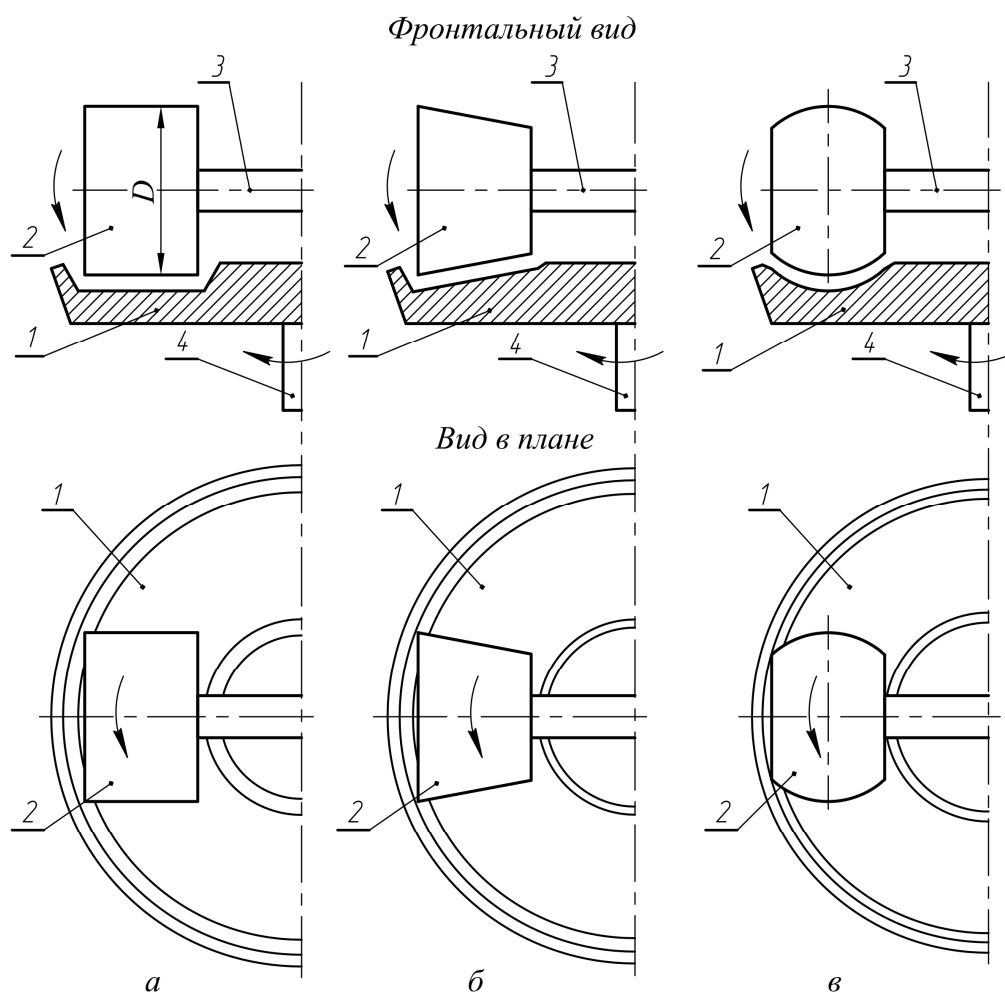
Высокие энергетические затраты в металлургии обусловлены главным образом потреблением и стоимостью кокса и природного газа на тонну выплавленного чугуна [1, 2]. Ещё в середине XX века отечественные предприятия и фирмы иностранных государств активно работали над проблемами снижения расхода природного газа, металлургического кокса при одновременном повышении его качества, а также замены части кокса пылеугольным топливом (ПУТ) в структуре теплоносителей доменной плавки [3].

Для приготовления ПУТ в металлургической отрасли используют три основных типа измельчительных устройств: шаровые, молотковые и валковые мельницы. Наиболее эффективными по технико-экономическим показателям (установленной мощности, удельному расходу энергии, капитальным вложениям) являются

валковые мельницы [4]. Этим обусловлено то, что для измельчения углей под ПУТ в мировой практике применяют валковые мельницы нескольких конструктивных конфигураций и типоразмеров. Принципиальные их отличия заключаются в кинематике силовой цепи привода, числе и геометрической форме размольных элементов машины. Однако процесс измельчения углей любой из мельниц осуществляется одинаково: путём раздавливания (рис. 1) и частичного истирания материала между тарелью (далее столом) и валками [4].

Помольные валки по геометрической форме рабочей поверхности бывают цилиндрическими, коническими и тороидальными (рис. 1).

Принципиальное устройство измельчительного механизма мельниц представлено на рисунке 1, где обозначены позиции: 1 — стол мельницы; 2 — размольный валок (иногда его называют жернова); 3 — элементы сборочной единицы валков; 4 — опорный узел стола. Рабочие поверхности столов имеют такую же форму, как и рабочие поверхности размольных валков: плоскую (рис. 1, а, б) и криволинейную (рис. 1, в). По количеству размольных валков в зависимости от конструктивных особенностей и производительности мельницы бывают двух-, трёх- и четырёхвалковые.



Мельничные валки: а — цилиндрической, б — конической, в — тороидальной формы

Рисунок 1 Схематическое расположение мелющих валков на размольном столе

Широкое применение для размола каменных углей до пылевидного состояния получили валковые среднеходные мельницы с коническими валками и оборудованные сепараторами. В Российской Федерации изготавливают размерный ряд таких мельниц типа МВС (мельница валковая среднеходная) по стандарту ГОСТ Р 55853-2013. Типоразмерный ряд начинается с наименьшей МВС-90 и заканчивается наибольшей МВС-340 мельницей. Часть мельниц типоразмерного ряда МВС-90 ... МВС-245 — двухвалковые; МВС-260 ... МВС-280 — трёхвалковые; МВС-310, МВС-340 — четырёхвалковые. Удельный расход электроэнергии на размол угля составляет в среднем от 13,4 кВт·ч/т (у МВС-90) до

9,1 кВт·ч/т (у МВС-340), т. е. мельницы высокой производительности более энергоэкономные. Число после аббревиатуры обозначает значение расчётного диаметра размольного стола в сантиметрах [5].

Конструкция мельницы с коническими размольными холостыми валками и приводным вращающимся столом представлена на рисунке 2. Главные составляющие мельниц для приготовления ПУТ — это размольный стол и размольные валки. В зависимости от кинематического исполнения существует две основных модели мельниц: 1) с неподвижным столом и приводными вращающимися вокруг собственной оси и движущимися по неподвижному столу валками; 2) с приводным вра-

щающимся столом и неприводными валками, вращающимися вокруг своих осей за счёт сцепления с измельчаемым материалом. Мельницы второй модели имеют ряд преимуществ перед первыми:

– более высокая производительность;

– крепление узла валков несколько проще, но в то же время более надёжное;

– на валки не действуют центробежные силы;

– удобство замены (при необходимости) узла валка.

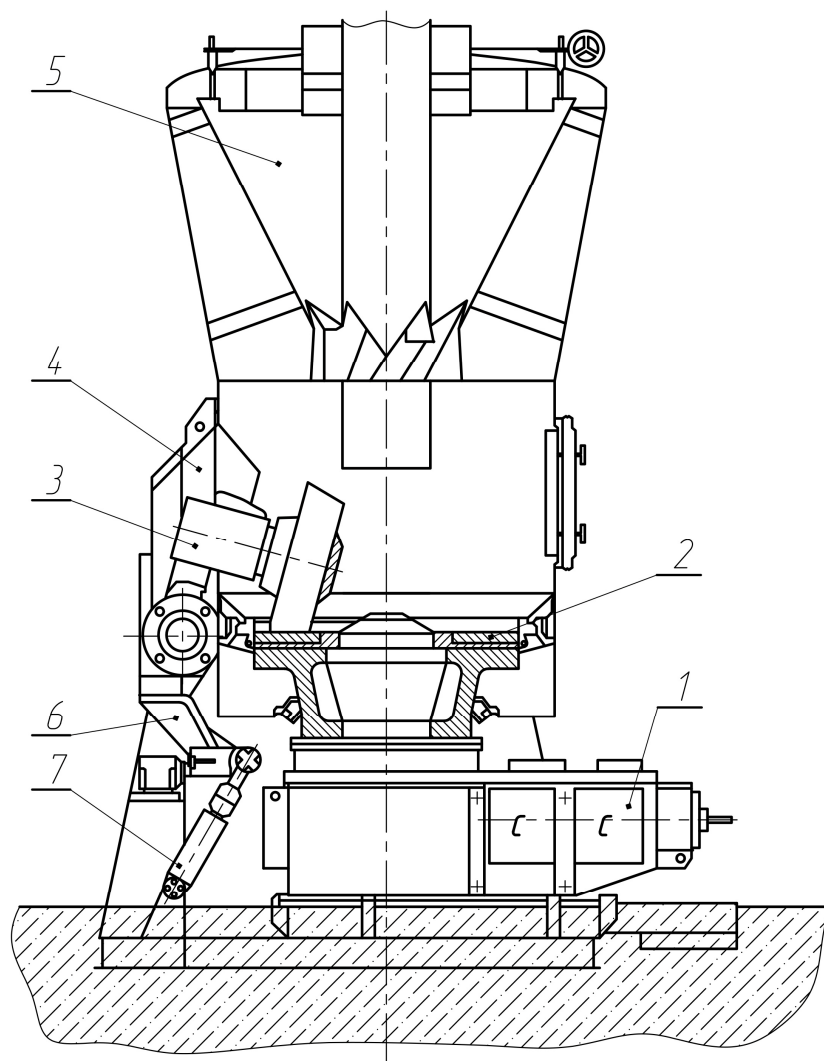


Рисунок 2 Конструкция валково-тарельчатой мельницы: 1 — привод вращения стола; 2 — размольный стол; 3 — узел размольного конического валка; 4 — крышка валка; 5 — сепаратор; 6 — рычажный узел; 7 — гидроцилиндр прижима валка к столу

Металлургические предприятия Донбасса, ПАО «Алчевский металлургический комбинат» (АМК) и ПАО «Енакиевский металлургический завод» (ЕМЗ), для систем приготовления ПУТ приобрели валково-тарельчатые измельчители вертикального типа, в которых мельница и сепаратор объединены в общее целое изделие.

Технические параметры названных мельниц даны в таблице 1.

ПАО «АМК» приобрело по контракту две вертикальные трёхвалковые мельницы MPS 3070 ВК и MPS 3350 ВК с воздушным сепаратором SLS 2650 ВК. Изготовитель — немецкая фирма Pfeiffer (г. Кайзерслаутерн).

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Таблица 1

Техническая характеристика валково-тарельчатых мельниц для приготовления ПУТ

Наименование конструктивного компонента	Металлургические предприятия			
	ПАО «АМК»		ПАО «ЕМЗ»	Buscher Power
Тип мельницы	MPS 3070 BK	MPS 3350 BK	LM 28.2 D	LM 23.2 D
Воздушный сепаратор	SLS 2650 BK	–	LSKS 43ZDz	–
Производительность, т/ч	70	100	52,5	42
Мелющие валки:				
– форма	тороидальная	тороидальная	коническая	коническая
– диаметр, мм	1750	–	1700×1900*	–
– ширина, мм	615	–	500	–
– количество, шт.	3	3	2	2
Исполнение обода бандажа	цельное	цельное	цельное	цельное
Масса бандажа, кг	3950	4310	2000	–
Масса вала в сборе, кг	13600	14840	12560	–
Материал бандажа	хромистое литьё		износостойкий чугун	
Размольный стол:				
– диаметр расчётный, мм	3070	3350	2800	2300
– конструктивное исполнение	сегментированное	сегментированное	сегментированное	сегментированное
– кол-во сегментов, шт.	13	13	6	–
– масса сегмента, кг	545	750	270	–
– материал сегментов	хромистое литьё			
Главный привод вращения стола	электромеханический			
Электродвигатель:				
– тип	JRR5563-6jA70z	–	–	–
– мощность, кВт	1100	1200	600	450
– частота вращения, мин ⁻¹	1000	–	1000	–
Главный редуктор:				
– тип	KMP 450	–	–	–
– передаточное число	39,915	–	–	–
– частота вращения стола, мин ⁻¹	25,05	–	37,5	–
Упорный подшипник стола:				
– конструкция	Сегментный упорный подшипник		–	–
– нагрузка, кН:				
нормальная (статич.)	3700	–	–	–
максимальная (динамич.)	9700	–	–	–

* Соответственно диаметры меньшего и большего оснований усечённого конуса

Для ПАО «ЕМЗ» закуплены две двухвалковые мельницы типа LM 28.2 D фирмы Loesche (Германия). Эта же фирма изготовила и поставила мельницы LM 23.2 D предприятию Buscher Power (Индия). Со-

гласно реализуемым проектам ввода в эксплуатацию систем приготовления и подачи ПУТ, обе машины MPS ПАО «АМК» обеспечат обслуживание четырёх доменных печей, тогда как на ПАО «ЕМЗ» одна уста-

новка LM обеспечивает ПУТ две доменные печи. Вторая мельница используется как запасная. На данное время на каждом предприятии введено в эксплуатацию по одной мельнице. Общность между мельницами фирм Pfeiffer AG и Loesche состоит в том, что приводными являются размольные столы. Отличие заключается в форме мелющих валков: у первых она тороидальная, у вторых — коническая (рис. 1, б, в). Кроме того, в этих мельницах отличительным признаком является конструктивное исполнение механизма прижима узла измельчительного валка к размольному столу. В мельнице (рис. 2) используется гидроцилиндр 7, который через рычажный узел 6 осуществляет регулируемый прижим валка в процессе измельчения и вывод его наружу с целью контроля технического состояния, если необходимо — ремонта или замены. Каждый валок оборудован индивидуальным гидроприводом.

В мельницах MPS, установленных в доменном цехе АМК, использовано другое конструктивное решение. Необходимая для измельчения материала сила прижатия вырабатывается гидропневматическим устройством. Мелющие три валка вместе с общей прижимной рамой и тремя тягами от гидроцилиндров образуют статически определенную систему, которая обеспечивает равномерное распределение нагрузки (в трех точках под 120°) на размольном столе [4]. Тем самым обуславливается и равномерность нагрузки на сегментные упорные подшипники редуктора, воспринимающие вес стола с измельчаемым материалом, усилие от веса валков и усилия их прижима гидропневматической системой. С этой точки зрения трёхвалковые мельницы имеют определённое преимущество перед двухвалковыми измельчительными устройствами любых систем.

В последние годы предпочтение отдаётся мельницам с приводными столами и холостыми валками благодаря более простой конструкции привода. Мелющие валки вращаются вокруг своих горизонтальных осей за счёт приводного усилия от стола

через посредство измельчаемого материала. Валки в процессе работы мельницы могут покачиваться на слое измельчаемого угля, но их горизонтальные оси неизменны относительно первоначальной вертикальной плоскости, в которой они смонтированы.

Из-за возможности выполнения качательного движения и гидропневматической подвески системы натяжения мелющие валки настраивают на оптимальное взаимодействие с размольным столом.

Под действием силы сжатия и сил истирания уголь измельчается и перемещается к сопловому кольцу, расположенному по периферии мельничного стола. Воздух, поступающий снизу через сопловое кольцо, проходит сквозь размалываемый материал, образуя вращающийся взвешенный слой. Мелкие частицы захватываются потоком газа и направляются вверх к сепаратору. Более крупные частицы поступают опять на размольный стол. Дальнейшее сепарирование измельчённых частиц осуществляется колесом сепаратора: частицы толщиной 80–90 мкм потоком газа направляются в технологическую магистраль, а более крупные — обратно на размольный стол.

Наиболее изнашиваемыми элементами валково-тарельчатых мельниц являются рабочие поверхности измельчающих инструментов — бандажи валков и сегменты стола. Мелющие валки в конструктивном отношении состоят из корпуса, к которому посредством клеммового соединения прикреплён торовидный бандаж (обод), что обеспечивает, при необходимости, его удобную замену.

Рабочая поверхность стола образована из отдельных сегментов, соединённых между собой клеммовым креплением. По окружности стола сегменты образуют желобчатую кольцевую бегунковую дорожку, по которой вращаются стационарно установленные неприводные мелющие валки. Между бандажами и сегментами находится слой измельчаемого материала.

Длительность рабочей кампании размалывающих элементов мельниц обусловлена абразивными свойствами обрабатываемого

мого материала и противоизносной стойкостью рабочих поверхностей бандажей валков и сегментов стола.

Для анализа примем антрацит как наиболее прочный уголь, добываемый в Донбассе. Исследование прочности сжатием проводили на образцах кубической формы размером ребра 40, 30, 20 и 15 мм. Для каждого размера использовали четыре пробы [6]. Результаты испытаний представлены в таблице 2.

Анализ данных таблицы 2 свидетельствует об отсутствии определённой закономерности разрушения образцов антрацита, кроме той, что с уменьшением размера

проб (кубик 15 мм) снижается значение напряжения, при котором они разрушаются. Разброс показателей прочности составил от 3,6 МПа до 0,5 МПа. Средневзвешенное значение напряжений разрушения образцов: наибольшее — 2,2 МПа (40 мм), наименьшее — 0,975 МПа (20 мм). Все 16 опытов на исследуемых образцах дали среднеарифметическое значение напряжения разрушения антрацита 1,575 МПа. Следует предположить, что это значение должно приниматься в теоретических расчётах как энергоёмкости процесса измельчения антрацита, так и влияния её на износные характеристики инструмента.

Таблица 2

Значение прочности на сжатие для различных размеров проб антрацита

№ образца	Размер ребра образца, мм	Напряжения, при которых разрушились пробы, МПа				Усреднённая величина
		Номер опыта				
		1	2	3	4	
1	40	2,1	0,9	3,6	2,2	2,200
2	30	2,5	1,5	2,1	1,0	1,775
3	20	0,9	1,2	0,5	1,3	0,975
4	15	1,0	1,2	1,1	2,1	1,350

Другой важной характеристикой прочностных свойств антрацита является его ударная прочность при испытаниях сбрасыванием (табл. 3).

Из результатов испытания прочности антрацита на сбрасывание вытекает, что наивысшей ударной прочностью обладают угли поставщиков №№ 5, 6, 7. Самая низкая прочность у антрацита шахты «София Бродская». На интенсивность износа рабочих поверхностей бандажей и сегментов оказывает влияние обобщённый коэффициент трения измельчаемого материала по металлу, пределы которого для свежедроблёных углей составляют 0,2...0,3 (табл. 4) [7].

Экспериментальные значения износа бандажей и сегментов определяли на промышленной мельнице MPS 3070 ВК в условиях доменного цеха ПАО «АМК». Мельница введена в эксплуатацию 20.08.2009 г. За период до 27.10.2010 г. на ней было переработано 196 тыс. тонн ка-

менного угля, в составе которого зачастую преобладал антрацит донецких угледобывающих предприятий (табл. 3). Периодичность контрольных замеров и их результаты представлены в таблице 4.

Приведённое календарное время периодов контрольных замеров значительно больше машинного времени процесса измельчения. Об этом свидетельствуют простые расчёты с учётом проектной производительности мельницы 70 т/ч. Поэтому следует признать факт имевших место простоев машины или несоответствия её часовой производительности, указанной в паспорте.

В качестве основных факторов, влияющих на износ рабочего инструмента, выбраны: количество переработанного угля, его абразивные свойства, размеры кусков исходной шихты и конечного продукта (ПУТ), механические параметры материала бандажей и сегментов.

Таблица 3

Данные кусковатости проб антрацита после испытания их сбрасыванием

№	Поставщик антрацита	Средний диаметр кусков проб, мм		
		до испытаний	после испытаний	Относительное уменьшение среднего диаметра после сбрасывания, %
1	Шахта «София Бродская»	50,0	32,0	64,0
2	Постиково	50,0	34,4	68,8
3	ЦОФ «Нагольчанская»	50,0	36,2	72,4
4	Красный Луч	50,0	37,0	74,0
5	Ровеньки-Антрацит	50,0	39,2	78,4
6	Дарьевка	50,0	39,3	78,6
7	Лобовские Копи	50,0	40,1	80,2
Средневзвешенные значения			36,88	73,8

Таблица 4

Данные о величине износа рабочего инструмента вертикально-тарельчатой мельницы MPS 3070 BK

№	Дата выполнения контрольных замеров	Время эксплуатации с момента запуска в работу, часов	Измельчено угольной шихты, тыс. т	Наибольший износ рабочей поверхности, мм		Суммарный износ, мм
				бандажа валка	сегмента стола	
1	25.11.2009	1600	72	15	15	30
2	03.06.2010	3133	157,95	25	26	51
3	08.02.2011	4387	196	30	38	68

На основании показателей таблицы 4 построен график зависимости износа рабочих поверхностей мелющих элементов от количества обработанного угля (рис. 3).

Рассмотрение этих данных позволяет сделать вывод о практически прямолинейной зависимости износа рабочих поверхностей бандажей и сегментов от количества переработанной угольной массы. С момента запуска в работу и до 3100 часов эксплуатации (измельчено более 150 тыс. т угля) максимальный износ рабочих поверхностей мелющих инструментов практически одинаков: бандажей — 25 мм, сегментов — 26 мм. Однако дальнейшая работа мелющих элементов обусловила более ускоренный износ сегментов стола, о чём свидетельствуют контрольные замеры после измельчения 190 тыс. т угля (износ бандажей составил 30 мм, сегмента — 38 мм). Суммарный максимальный износ обоих элементов достиг

значения 68 мм, и их пришлось снять на ремонт (восстановление), поскольку допускаемое паспортное значение износа 70 мм.

Связано это с тем, что размер кусков исходного материала углей не должен превышать 80 мм. По условиям эксплуатации не допускается непосредственный контакт бандажа и сегмента. Бандажи валков и сегменты стола изготовлены способом литья из высокохромистого износостойкого чугуна 300X13Г3С2М. Более интенсивный износ сегментов обусловлен двумя причинами. Первая заключается в том, что согласно паспорту мельницы, частота вращения стола составляет $25,05 \text{ мин}^{-1}$. Если принять условие об отсутствии проскальзывания бандажа неприводного валка по слою измельчаемого угля, то при его диаметре 1750 мм частота вращения бандажа составит $35,05 \text{ мин}^{-1}$. Соотношение частот вращения бандажа и сегментов стола состав-

ляет 1,4. Поскольку мельница трёхвалковая, то за один оборот стола фиксированная точка на сегменте встретится с фиксированной точкой на бандаже $1,4 \times 3 = 4,2$ раза. Очевидно, что при таких условиях изнашивание поверхности сегментов будет более интенсивным, особенно это стало заметным после измельчения 160 тыс. т угольной шихты. Следует предположить, что после многоциклового (порядка 24 млн. циклов) нагрузки материал сегментов на рабочей поверхности накопил усталость и его сопротивляемость износу заметно снизилась.

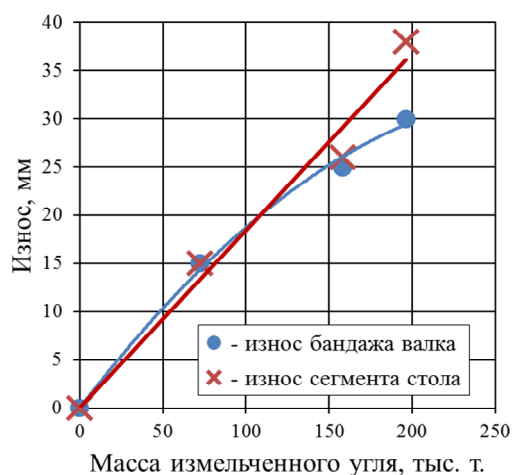


Рисунок 3 Зависимость износа рабочего инструмента от количества измельченного угля

Конструктивная схема бандажа с видом изношенной и восстановленной рабочей поверхности представлена на рисунке 4.

Реальный сегмент размольного стола после наплавки износостойким материалом приведён на фотографии (рис. 5).

Наличие экспериментальных данных о величине и характере износа рабочих поверхностей измельчительного инструмента мельниц обуславливает сроки вывода его на ремонтно-восстановительные операции. Изношенные поверхности бандажа и сегментов подвергаются восстановлению износостойкими композитными материалами, чем обеспечивается повышенный ресурс мельниц до следующей реставрации мелющих элементов.

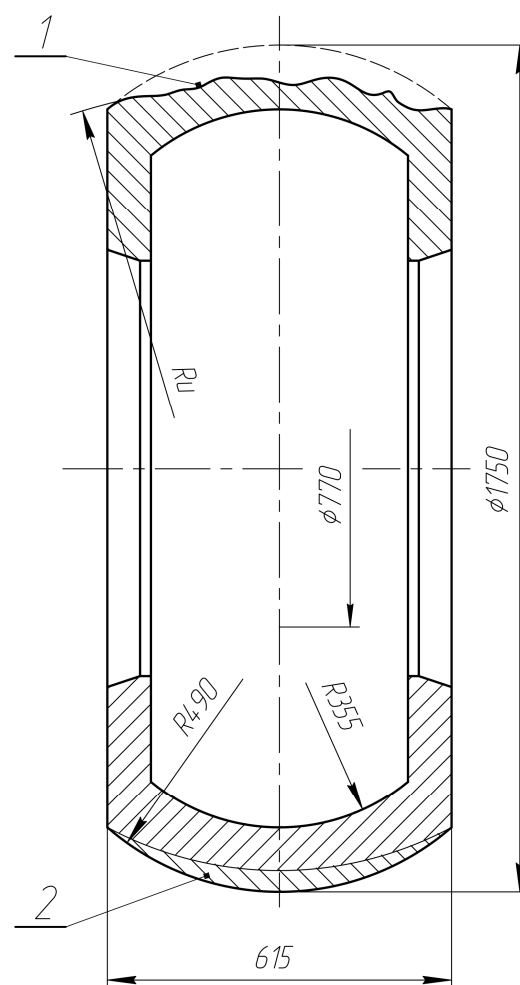


Рисунок 4 Конструкция бандажа и состояние его рабочей поверхности: 1 — изношенной; 2 — после восстановления

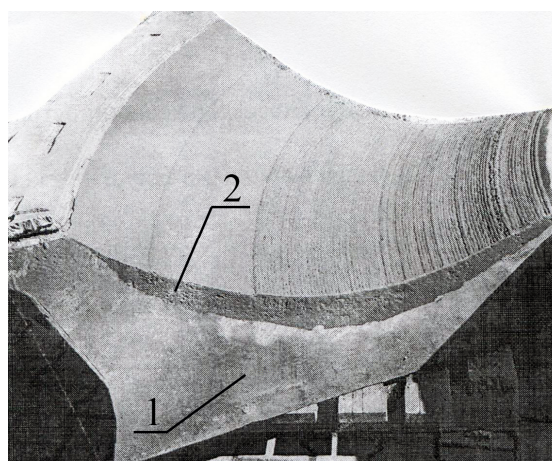


Рисунок 5 Вид восстановленной рабочей поверхности сегмента помольного стола. 1 — основной металл; 2 — наплавленный слой

Выводы:

1. С точки зрения равномерности распределения нагрузки на рабочие элементы измельчительного механизма преимущество принадлежит трёхвалковым мельницам как статически определяемым системам.

2. Время работы мельницы, в отличие от других машин, ограничивается сроком износа мелющих элементов — бандажей

валков и сегментов стола. Срок работы до ремонта для мельницы MPS 3070 BK на ПАО «АМК» составляет около 4400 часов при намоле 200 тыс. т ПУТ.

3. Более интенсивному износу подвержены сегменты стола мельниц, что обусловлено, при всех прочих равных условиях, конструктивными особенностями и кинематическими параметрами машины.

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. Ульяницкая, О. В. *Анализ использования и экономии энергии на предприятиях металлургического комплекса Украины [Текст] / А. В. Ульяницкая, Н. В. Коваленко // Вісник Дніпропетровського національного університету ім. Гончара. — Днепропетровск, 2010. — № 10/1, том 22. — С. 89–95.*

3. *Alternate Carbon Sources for Sintering of Iron Ore (Acasos) [Text] / Roland Pietruck and others. — 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, 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. 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.*

7. Спиваковский, А. О. *Транспортирующие машины [Текст] / А. О. Спиваковский, В. К. Дьячков. — [2-е изд., перераб. и доп.]. — М. : Машиностроение, 1968. — 504 с.*

© Ульяницкий В. Н.

© Новохатский А. М.

© Петров П. А.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Харламовым Ю. А., д.т.н., проф. каф. МОЗЧМ ДонНТУ Ерньою С. П.

Статья поступила в редакцию 28.02.18.

**к.т.н. Ульяницкий В. Н., д.т.н. Новохатский О. М., Петров П. О. (ДонГТУ, м. Алчевськ, ЛНР)
АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ І ФУНКЦІОНАЛЬНИХ
МОЖЛИВОСТЕЙ МЛИНІВ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ ПИЛОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА**

У статті розглянуто питання порівняльного комплексного дослідження конструктивних особливостей і чинників, що обумовлюють зносні характеристики робочого інструменту млинів приготування пиловугільного палива для доменних печей.

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

**PhD Ulianitskiy V. N., Doctor of Tech. Sc. Novohatskiy A. M., Petrov P. A. (DonSTU, Alchevsk, LPR)
ANALYZING THE DESIGN FEATURES AND FUNCTIONAL CAPABILITY OF MILLS FOR
PULVERIZED COAL PREPARATION**

The paper is dedicated to the complex research problems on the design features and factors stipulated the wear properties of operating element of mills of pulverized coal preparation for the blast furnaces.

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