

**К.В.Баюл, В.И.Петренко**

## **МЕТОД ОЦЕНКИ ИЗНОСА БАНДАЖЕЙ ВАЛКОВЫХ ПРЕССОВ НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Разработан новый расчетно–аналитический метод оценки износа бандажей валковых прессов на различных стадиях их эксплуатации с учетом свойств брикетируемых материалов, включающий математическую модель определения износа и построение топограмм износа. Рассмотрен конкретный пример применения предложенного метода для установления графических и аналитических зависимостей между величиной износа бандажей, энергосиловыми и технологическими параметрами брикетирования.

**валковый пресс, бандажи, износ, математическая модель, топограммы**

**Постановка задачи.** Для оценки возможности эксплуатации бандажей валковых прессов на разных стадиях износа и выбора допустимых режимов их работы необходимы методы и средства определения геометрических параметров рабочих поверхностей в процессе их изнашивания. Для решения этой задачи в данной работе предложено применение топограмм износа бандажей. Топограммы представляют собой графическое отображение профилей бандажей, построенных для различных стадий износа с заданной дискретностью.

**Целью исследований является** разработка расчетно–аналитического метода исследования влияния износа бандажей валковых прессов на параметры брикетирования с помощью топограмм.

**Изложение основных материалов исследования.** Разнообразие, а иногда и противоречивость данных, имеющихся в технической литературе о механизме изнашивания деталей машин, затрудняет разработку математической модели, учитывающей многофакторность процесса взаимодействия бандажа и шихты в зоне прессования. Наиболее соответствующими условиям решаемой задачи являются модели износа прокатных валков [1, 2]. Эти модели базируются на известных теориях износа [3, 4].

Особенность процесса износа бандажей валковых прессов заключается в том, что разрушающими телами являются твердые частицы брикетируемой шихты, поэтому поверхность фрикционного взаимодействия представляет собой совокупность пятен контактов, количество и характер которых постоянно меняется. Изнашивание бандажей валковых прессов происходит в результате многократного упругого и пластического деформирования одних и тех же микрообъемов материала рабочей поверхности на контактах с твердыми частицами брикетируемой шихты, которое вызывает усталостное разрушение поверхностного слоя материала бандажей. При этом процессами адгезии и схватывания можно пренебречь, так как они незначительны. Учитывая

сказанное, для создания модели износа, которая бы отражала условия механического взаимодействия шихты с рабочими поверхностями бандажей, наиболее предпочтительным является использование молекулярно–механической теории трения и усталостной теории износа твердых тел, которая была разработана в СССР под руководством И.В.Крагельского [4].

В основе молекулярно–механической теории трения лежит представление о дискретности контакта твердых тел и развитии на этих контактах деформационных процессов. Поэтому допустимо использование аналитических зависимостей молекулярно–механической теории трения и усталостной теории в качестве исходных при разработке математической модели износа бандажей. Выполнив адаптацию этих зависимостей к условиям брикетирования, можно получить математическую модель для прогнозирования износа бандажей. В этой теории в качестве характеристик износа используются интенсивность изнашивания  $I_h$  и удельная интенсивность изнашивания  $i_h$ , определяемые следующими соотношениями [4, 5]:

$$I_h = \frac{dh}{dS} = \frac{dW}{A_0 dS}, \quad (1)$$

где  $h$ ,  $W$  – линейный или объемный износ соответственно;

$S$  – путь трения;

$A_0$  – номинальная площадь трения.

$$i_h = \frac{V_D}{n_{\text{ср}} A_r d_k}, \quad (2)$$

где  $V_D$  – деформированный объем изнашиваемого материала, который разрушается после  $n_{\text{ср}}$  циклов фрикционного взаимодействия;

$A_r$  – фактическая площадь контакта;

$d_k$  – средний диаметр пятна контакта.

Интенсивность изнашивания  $I_h$  является характеристикой всей поверхности трения, а удельная интенсивность изнашивания  $i_h$  – единичного пятна контакта.

В выражение (2) для определения удельной интенсивности изнашивания входят характеристики фрикционного контакта. Это позволяет при разработке математической модели для прогнозирования износа, адаптированной к условиям брикетирования, учесть свойства контактирующих материалов и условия взаимодействия бандажей

валковых прессов с брикетуемой шихтой. Величина  $i_h$  определяется механическими свойствами материала бандажа и брикетуемой шихты, в первую очередь, ее гранулометрическим составом. Учитывая многообразие механических свойств брикетуемых материалов и значительные колебания характеристик, предпочтительным является экспериментальное определение значения удельной интенсивности изнашивания.

Соотношение между интенсивностью изнашивания  $I_h$  и удельной интенсивностью изнашивания  $i_h$  определяется выражением [4, 5]:

$$I_h = i_h \frac{A_r}{A_a} = i_h \frac{p_a}{p_r}, \quad (3)$$

где  $A_a$  – номинальная площадь контакта;

$p_a$  – номинальное давление на контакте;

$p_r$  – фактическое давление на контакте.

Исследования, приведенные в работе [6], показывают, что при пластическом деформировании в первом приближении можно принять:

$$p_r \approx HB. \quad (4)$$

С учетом (4) выражение (3) для определения интенсивности изнашивания можно записать в виде:

$$I_h = i_h \frac{p_a}{HB}, \quad (5)$$

Выражение (5) учитывает влияние механических свойств материала бандажей на интенсивность их износа.

Номинальная площадь контакта  $A_a$  равна площади участка рабочей поверхности бандажей, находящегося в очаге деформации, величина которой определяется углом прессования или длиной дуги прессования. Величина номинального давления на контакте  $p_a$  равна величине нормальной составляющей  $p_{n.i}$  контактных напряжений, определяемых сопротивлением шихты сжатию, и выражение (5) можно записать в следующем виде:

$$I_h = i_h \frac{p_{n.i}}{HB}, \quad (6)$$

В работе [7] приведены расчетные схемы определения контактных напряжений  $p_{n,i}$ , учитывающие физико–механические свойства шихтовых материалов, размеры и конфигурацию рабочей поверхности бандажа.

Учитывая, что валки пресса вращаются с постоянной частотой, выражение (1) можем записать в виде:

$$I_h = \frac{dh}{dS} = \frac{h}{S}. \quad (7)$$

Рабочая поверхность бандажей имеет сложную криволинейную конфигурацию, поэтому для каждой точки рабочей поверхности величина контактных напряжений  $p_{n,i}$  и путь трения за один оборот  $S$ , будет различной. Каждой точке рабочих поверхностей бандажей будет соответствовать свое значение интенсивности изнашивания  $I_h$ . Этим и определяется неравномерность износа рабочих поверхностей бандажей.

Совместное решение уравнений (6) и (7) позволяет получить выражение для определения величины линейного износа:

$$h = i_h \frac{p_{n,i}}{HB} S. \quad (8)$$

Чтобы учесть влияние конфигурации поверхности на неравномерность изнашивания, контур формирующего элемента в поперечном и продольном сечении разбивается на определенное количество контактных площадок. С помощью выражения (8) для каждой из таких площадок определяется величина линейного износа.

Вращение валков пресса определяет периодичность взаимодействия каждой точки рабочей поверхности бандажей с шихтой на дуге прессования, поэтому величина пути трения  $S$  может быть выражена через количество оборотов валков и путь, проходимый данной точкой по дуге прессования за один оборот валков. Для любой точки рабочей поверхности бандажа величина пути трения определяется выражением

$$S = S_1 n_k, \quad (9)$$

где  $S_1$  – длина пути, проходимая контактной площадкой на дуге прессования за один оборот валка;

$n_k$  – количество оборотов валка.

С учетом (9) выражение (8) примет вид:

$$h = i_h \frac{p_n}{HB} S_1 n_k . \quad (10)$$

Значение  $S_1$  для любой точки контура рабочей поверхности бандажа можно выразить через радиус  $R$ , определяющий положение точки контура рабочей поверхности бандажа относительно оси валка, и угол прессования  $\alpha$  следующим образом:

$$S_1 = \frac{\pi R \alpha}{180^\circ} \quad (11)$$

С учетом (11) выражение (8) примет вид:

$$h = i_h \frac{p_n}{HB} \cdot \frac{\pi R \alpha}{180^\circ} n_k . \quad (12)$$

Полученное выражение (12) представляет собой математическую модель оценки износа бандажей валковых прессов. Разработанная модель является составной частью метода построения топограмм и применения их для оценки допустимости эксплуатации бандажей при различной степени износа. Как уже отмечалось, топограммы износа являются графическим отображением контура рабочей поверхности изношенных бандажей. Для получения совокупности графически построенных изношенных контуров бандажей необходимо задаться дискретностью их построения. В качестве параметров, задающих дискретность построения топограмм, приняты периоды эксплуатации бандажей, определяемые количеством оборотов валков пресса  $n_k$ . Используя полученную математическую модель, для контактных площадок, на которые разбивается контур формирующего элемента, определяется величина линейного износа. Зная координаты исходного контура и величину линейного износа, можно определить координаты точек, принадлежащих новому (образованному в результате износа) контуру поверхности бандажа. В соответствии с принятой дискретностью по этим точкам выполняется построение профилей рабочей поверхности бандажа при различной степени износа.

На рис.1 приведена схема метода применения разработанной математической модели для определения координат точек, принадлежащих контуру изношенного бандажа, и построения топограмм износа. В соответствии с этой схемой созданы расчетные и графические программы построения топограмм износа.

На рис.2 представлена схема метода применения топограмм для исследования влияния степени износа бандажей на технологические и энергосиловые параметры брикетирования.

В качестве примера практической реализации предложенного метода приведены необходимые для построения топограмм расчеты,

выполненные для зубчато–желобчатой конфигурации формирующих элементов и заданных характеристик бандажей: межосевое расстояние валков пресса 648мм; ширина рабочей поверхности бандажей 350мм, размеры ячейки 39,8×36×18мм. Твердость рабочих поверхностей бандажей –  $HB = 6540$ МПа.

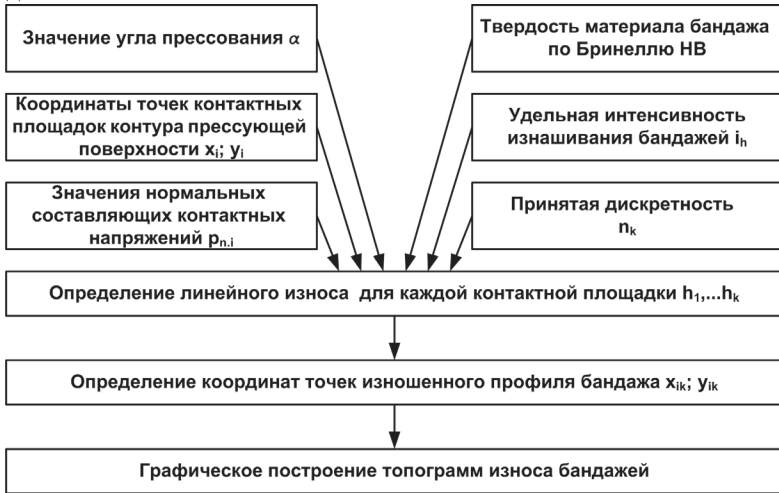


Рис. 1. Схема метода применения математической модели для построения топограмм износа бандажей

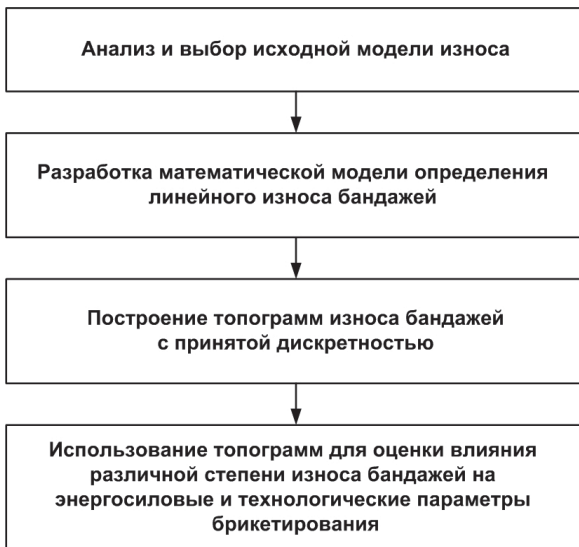


Рис. 2. Схема метода применения топограмм износа бандажей для оценки влияния износа бандажей на параметры брикетирования

Значение удельной интенсивности изнашивания  $i_h$  бандажей в работе определялось экспериментальным путем. Для этого использованы данные об износе нескольких комплектов бандажей, отработавших полный период эксплуатации в условиях ОАО «Никопольский завод ферросплавов» и на предприятии «Завод по производству брикетов для металлургической промышленности ООО Конкрет».

Замерив величину линейного износа бандажа в точках формующего профиля, с помощью выражения (12) определяли значение  $i_h$ .

В производственных условиях свойства брикетируемой шихты непостоянны и изменяются в пределах величин, установленных технологическим регламентом на производство брикетов. Некоторые из исследованных комплектов бандажей эксплуатировались в условиях брикетирования различных шихт. Поэтому, исходя из полученных практических данных, определено усредненное значение удельной интенсивности изнашивания для бандажей валковых прессов, равное  $6,642 \cdot 10^{-5}$ , которое и использовано в расчетах. В дальнейшем планируется создание специальной лабораторной установки и выполнение с ее использованием экспериментальных исследований взаимодействия различных шихт и материалов бандажей. Это позволит уточнить значения удельной интенсивности изнашивания для конкретных условий эксплуатации бандажей и непосредственно перейти к разработке методов прогнозирования развития во времени износа бандажей валковых прессов.

В табл. 1 и на рис. 3 приведены результаты расчетов и построенные топограммы для шихты: 96,5% силикомарганца и 3,5% органического связующего.

Дискретность построения топограмм (степень износа бандажей)  $k = 0 \dots 5$  определяется периодами эксплуатации бандажей  $n_1, \dots, n_k$  и задается количеством оборотов валков пресса. Построены топограммы для пяти степеней износа:  $k_1 - n_1 = 20000$  оборотов;  $k_2 - n_2 = 40000$  оборотов;  $k_3 - n_3 = 60000$  оборотов;  $k_4 - n_4 = 80000$  оборотов;  $k_5 - n_5 = 100000$  оборотов.

В качестве показателя степени износа бандажей принята величина зазора между рабочими поверхностями валков, определяемая согласно схеме, приведенной на рис. 4.

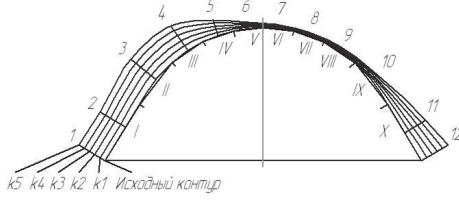
Используя построенные топограммы, с помощью разработанного ранее расчетно-аналитического аппарата [8] рассчитаны значения коэффициента уплотнения  $Ky_k$ , плотности брикетов  $\rho_{\text{б.б.к}}$ , усилия прессования  $P_k$  и момента прессования  $M_k$  (табл. 2).

Таблица 1 Расчетные данные для построения топограммы износа бандажей

Контактные площадки и	Точки контура формирующего элемента	n <sub>1</sub> =20000об.	n <sub>2</sub> =40000об.	n <sub>3</sub> =60000об.	n <sub>4</sub> =80000об.	n <sub>5</sub> =100000об.
I	1	0,708	1,416	2,124	2,833	3,541
	2	0,687	1,376	2,063	2,751	3,439
	3	0,750	1,500	2,250	3,001	3,752
	4	0,694	1,389	2,083	2,778	3,472
	5	0,372	0,745	1,117	1,489	1,861
	6	0,150	0,299	0,449	0,598	0,748
	7	0,090	0,180	0,270	0,360	0,450
	8	0,074	0,147	0,221	0,295	0,368
	9	0,085	0,170	0,256	0,341	0,426
	10	0,189	0,379	0,568	0,757	0,947
	11	0,565	1,131	1,696	2,261	2,827
	12	0,708	1,416	2,124	2,833	3,541
Продольное сечение формирующего элемента						
I	1	0,708	1,416	2,124	2,833	3,541
	2	0,707	1,415	2,122	2,829	3,536
	3	0,705	1,409	2,114	2,818	3,523
	4	0,700	1,399	2,100	2,798	3,498
	5	0,690	1,381	2,071	2,761	3,452
	6	0,673	1,346	2,019	2,692	3,365
	7	1,400	2,800	4,198	5,598	6,997
	8	1,365	2,730	4,096	5,461	6,826
	9	1,341	2,681	4,022	5,363	6,703
	10	1,331	2,661	3,991	5,322	6,653
	11	1,325	2,650	3,976	5,301	6,626
	12	1,324	2,647	3,970	5,294	6,617



а.



б.

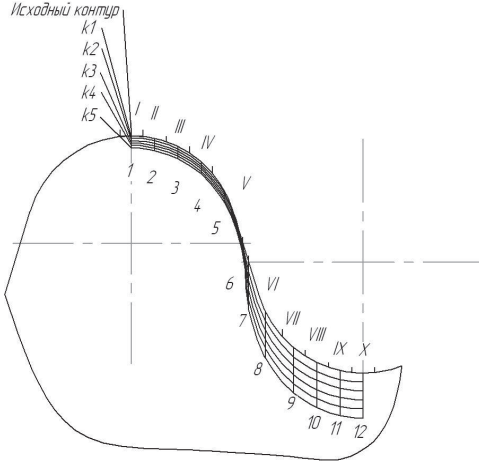
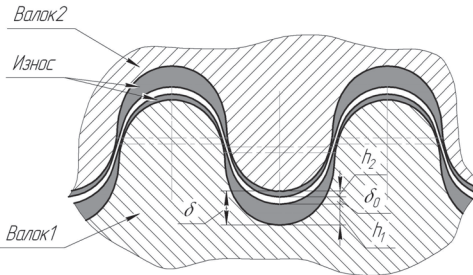


Рис. 3. Топограмма износа рабочей поверхности бандажа  
 а – поперечное сечение формующего элемента;  
 б – продольное сечение формующего элемента;



$$\delta = \delta_0 + h_1 + h_2,$$

где  $\delta_0$  – начальный зазор между валками;  $h_1$  и  $h_2$  – величина линейного износа рабочих поверхностей валков 1 и 2 соответственно.

Рис. 4 – Схема определения зазора между валками с учетом их

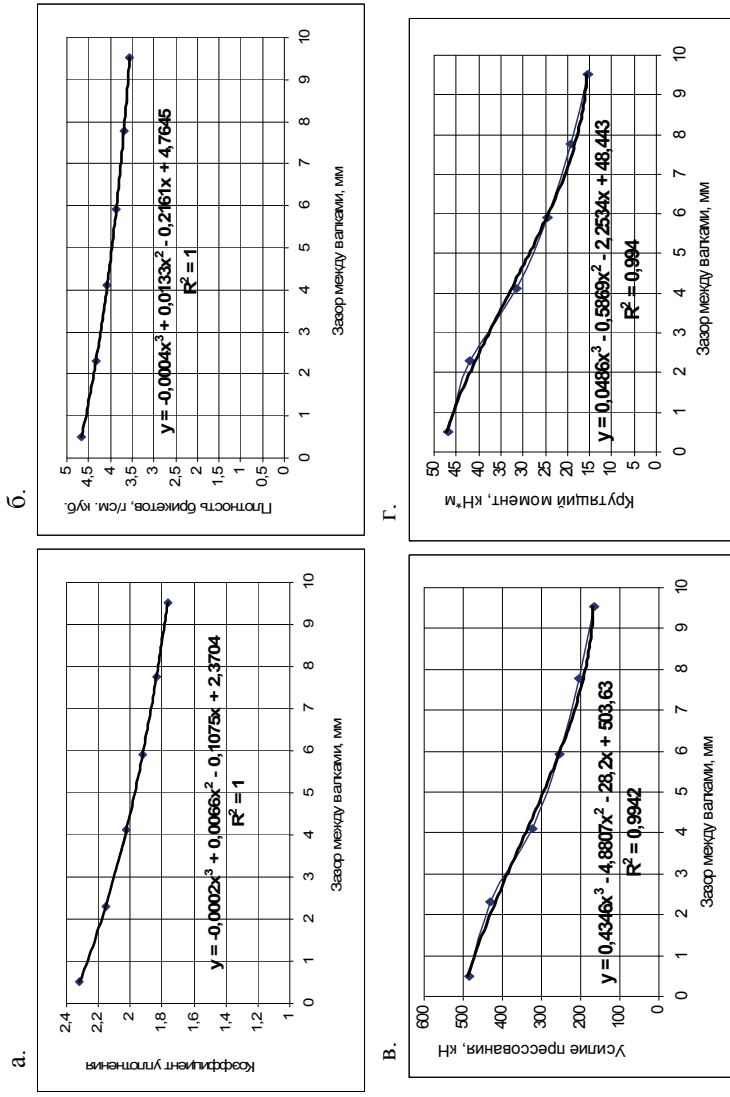


Рис. 5. – Зависимости технологических и энергосиловых параметров брикетирования от величины износа бандажей: а – коэффициент уплотнения; б – плотность брикетов; в – усилие прессования; г – момент прессования

Таблица 2 Расчетные значения технологических и энергосиловых параметров брикетирования для различной степени износа бандажей

$k$	$n_k$ , об.	$\delta_k$ , мм	$\hat{E}o_k$	$\rho_{\text{д.к.}}$ , г/см <sup>3</sup>	$P_k$ , кН	$M_k$ , кН·м
0	0	0,5	2,318	4,660	484,0	46,7
1	20000	2,3	2,155	4,331	432,0	42,1
2	40000	4,1	2,026	4,071	322,9	31,4
3	60000	5,9	1,923	3,866	253,4	24,3
4	80000	7,8	1,836	3,690	202,8	19,2
5	100000	9,5	1,767	3,551	164,4	15,4

По данным, приведенным в табл.2, построены графические зависимости параметров брикетирования от величины износа бандажей (рис. 5). Выполнена аппроксимация полученных графических зависимостей, результаты которой представлены на рис. 5 в виде линий тренда и описывающих их аналитических выражений.

Полученные графические и аналитические зависимости позволяют выполнить прогнозную оценку технологических и энергосиловых параметров брикетирования на различных стадиях износа бандажей.

**Заключение.** Разработанная математическая модель позволяет определить величину линейного износа и построить совокупность профилей бандажей на разных стадиях износа (топограмм) с учетом физико-механических характеристик шихтовых материалов, свойств материала бандажа, конфигурации формирующих элементов.

На базе разработанной математической модели предложен новый метод расчетно-аналитического исследования износа бандажей валковых прессов при различной степени их износа с помощью топограмм.

Показана возможность применения созданного метода для прогнозирования влияния износа на технологические и энергосиловые параметры брикетирования. Установленные с помощью представленного метода графические и аналитические зависимости между величиной износа и параметрами брикетирования могут быть использованы для оценки условий эксплуатации бандажей на разных стадиях износа, определения предельно допустимой величины износа, при которой возможно получение брикетов требуемого качества без нарушений режима работы прессового оборудования.

1. *Kim D. H.* Prediction of the wear profile of a roll groove in rod rolling using an incremental form of wear model / [D. H. Kim, Y. Lee, S. J. Yoo, W. Y. Choo and B. M. Kim] // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture January 1, 2003 vol. 217 no. 1 p. 111–126.

2. Воробей С. А. Прогнозирование износа рабочих валков широкополосного стана горячей прокатки. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. ИЧМ НАН Украины. – Вып. 12. – 2006. – С.213–220.
3. Archard, J. F. Contacts and rubbing of flat surface. // J. Appl. Phys. – 1953. – № 24. – P. 981.
4. Крагельский И. В. Основы расчетов на трение и износ / И.В.Крагельский, М.Н.Добычин, В.С.Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526с.
5. Польцер Г. Основы трения и изнашивания. / Г.Польцер, Ф.Майсснер [пер. с нем. О.Н.Озерского, В.Н.Пальянова]. Под ред. М.Н.Добычина. – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с.
6. Polzer G. Untersuchungen über Zusammenhängen zwischen Reibung und Verschleiß, insbesondere zwischen Reibkraft und Materialverlusterscheinungen. Dissertation B, Technische Hochschule Karl–Marx–Stadt 1973.
7. Баюл К.В. Петренко В.И. Анализ контактных напряжений на рабочих поверхностях бандажей валкового прессы. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб.научн.тр. ИЧМ НАН Украины. – Вып.25. – 2012. – С.245–255.
8. Баюл К. В. Аналитическое исследование влияния геометрических параметров формирующих элементов валковых прессов на процесс брикетирования. // Порошковая металлургия. – 2012. – №3/4. – С.38–49.

*Статья рекомендована к печати  
академиком НАН Украины В.И.Большаковым*

***К.В.Баюл, В.И. Петренко***

**Метод оцінки зносу бандажів валкових пресів на різних стадіях їх експлуатації**

Розроблено новий розрахунково–аналітичний метод оцінки зносу бандажів валкових пресів на різних стадіях їх експлуатації з урахуванням властивостей брикетованих матеріалів, що включає математичну модель визначення зносу і побудову топограми зносу. Розглянуто конкретний приклад вживання запропонованого методу для встановлення графічних і аналітичних залежностей між величиною зносу бандажів, енергосиловими і технологічними параметрами брикетування.