

BADANIA EKSPLOATACYJNE BIJAKÓW STALOWYCH OBROBIONYCH ELEKTROISKROWO

DETERMINING THE OPERATIONAL PROPERTIES OF STEEL BEATERS AFTER ELECTROSPARK DEPOSITION

W artykule przedstawiono wyniki badań eksploatacyjnych bijaków stalowych pracujących w młynie młotkowym odpadów papierowych. Badano stopień oraz rozwój procesów zużyciowych bijaków z powłoką naniesioną elektroiskrowo i bez powłoki. Powłoki nanoszone były przy pomocy urządzenia EIL-8A, natomiast elektrodę roboczą stanowił węgiel spiekany WC-Co. Ocenę własności eksploatacyjnych przeprowadzono na podstawie obserwacji mikrostruktury, pomiarów mikrotwardości, chropowatości oraz badań odporności na zużycie. Wyniki pracy ukierunkowały dalsze poszukiwania skutecznych metod podwyższenia trwałości bijaków młyna młotkowego.

Słowa kluczowe: obróbka elektroiskrowa, bijak stalowy, powłoka.

The tests were conducted to analyze the operational properties of steel beaters used in a hammer mill for waste paper recycling. The degree of wear and the development of wear processes were studied for specimens with and without electrospark deposited coatings. The coatings were produced using an EIL-8A; the working electrode was WC-Co sintered carbide. The operational properties of the specimens were assessed by analyzing their microstructure, microhardness, roughness and wear resistance. The results show that more effective methods are required to increase the durability of beaters for hammer mills.

Keywords: electrospark alloying, steel beater, coating.

1. Wstęp

Procesy tworzenia warstw wierzchnich na częściach metalowych związane są najczęściej z transferem materii i energii oraz reakcjami: chemicznymi, elektrochemicznymi i elektrotermicznymi, które im towarzyszą. Właściwości eksploatacyjne warstw wierzchnich (EWW), zależą przede wszystkim od pierwotnej postaci technologicznej warstwy wierzchniej (TWW) i sposobu jej konstituowania, głównie w aspekcie kumulowania energii, w obrabianym elemencie [2] (w tym także na jego powierzchni).

Wykorzystując biegunowość, w obróbkach wspomaganych prądem elektrycznym można sterować ich przebiegiem, dzięki czemu mogą one mieć charakter obróbek: przyrostowej lub ubytkowej.

Obróbka ubytkowa, wykorzystująca zjawisko erozji materiału obrabianego pod wpływem wyładowań elektrycznych, nosi nazwę obróbki elektroerozyjnej (EDM). W trakcie tej obróbki powstaje w obrabianym przedmiocie warstwa wierzchnia, która wpływa korzystnie na jego właściwości eksploatacyjne.

Obróbka elektroerozyjna przyrostowa, która w literaturze określana jest mianem obróbki elektroiskrowej (ESA), wykorzystuje zjawisko erozji materiału elektrody i wyładowań iskrowych, zachodzących między elektrodami, w efekcie czego, tworzy się technologiczna warstwa powierzchniowa o innych właściwościach niż materiał podłoża.

Elektroiskrowe nanoszenie powłok, należy do grupy metod, opartych na wykorzystaniu skoncentrowanego strumienia energii. Metoda powstała w latach czterdziestych, w ZSRR, prawie równocześnie z ubytkową obróbką elektroerozyjną. Zaczęto ją intensywnie rozwijać w latach sześćdziesiątych, a w latach siedemdziesiątych dość powszechnie używać do nanoszenia trudno topliwych materiałów na metale i ich stopy, głównie na

1. Introduction

Depositing protective layers on metal surfaces frequently involves matter and energy transfer, which is accompanied by various chemical, electrochemical and electrothermal reactions. To determine the operational properties of a surface layer, it is necessary to analyze the original, technological properties of the material, the deposition method, and, particularly, the mechanism of energy accumulation inside and outside the workpiece [2]. By controlling polarity, it is possible to remove or replace material.

The process of material removal involving erosion of the stock subjected to electric discharges is called electrical discharge machining (EDM). The surface layer forming on the product improves its operational properties.

The process of material growth resulting from electroerosion is known as electrospark alloying (ESA) or electrospark deposition (ESD). The erosion of the anode and the spark discharges between the electrodes result in the formation of a surface layer with properties different from those of the base material.

Electro-spark alloying is one of the methods that require concentrated energy flux. The method was first used in the USSR in the 1940s almost simultaneously with the destructive electrical discharge machining. The ESA technique was studied intensively in the 60s. In the next decade, it was commonly applied to deposit hard-melting materials on selected metals and alloys, mainly steel. Polish scientists became interested in electro-spark alloying of coatings as early as in the 80s. The method developed into a number of varieties can now be used not only to produce coatings but also to modify surface microgeometry [1, 4-8]. An electro-spark deposited coating is characterized by non-etched structure. It remains white after etching.

stale. W Polsce zaczęto interesować się nanoszeniem powłok elektroiskrowych na początku lat osiemdziesiątych. Współcześnie, stosowane są różne odmiany obróbki elektroiskrowej, spełniające zadania wytwarzania powłok, a także kształtowania mikrogeometrii powierzchni [1, 4-8].

Cechą charakterystyczną powłok nanoszonych elektroiskrowo jest to, że mają one specyficzną, nie trawiącą się strukturę - pozostają białe. Warstwa wierzchnia kształtowana jest w warunkach lokalnego oddziaływania wysokiej temperatury i dużych nacisków. Wartości podstawowych parametrów obróbki elektroerozyjnej są następujące [3]:

- ciśnienie fali uderzeniowej od iskry elektrycznej wynosi $(2\div 7) \cdot 10^3$ GPa,
- temperatura osiąga wartości rzędu $(5\div 40) \cdot 10^3$ °C.

W procesach technologicznych, współcześnie stosowane są różne odmiany obróbki elektroiskrowej. Warstwa wierzchnia, ukonstytuowana w rezultacie ich realizacji posiada założone cechy, zarówno w aspekcie struktury wewnętrznej, jak również struktury geometrycznej powierzchni (SGP).

2. Materiały i parametry obróbki

Przedmiotem badań, były powłoki nakładane elektrodą WC-Co (97% WC i 3% Co) o przekroju 3 x 4 mm (anoda), metodą elektroiskrową, na bijkaci stalowe, wykonane ze stali C45 (katoda). Skład chemiczny stali C45, przedstawiono w tabeli 1.

Do nanoszenia powłok elektroiskrowych użyto urządzenie produkcji ukraińskiej, model EIL-8A. Opierając się na doświadczeniach własnych oraz zaleceniach producenta urządzenia przyjęto następujące parametry nanoszenia powłok elektroiskrowych:

- napięcie $U = 230$ V,
- pojemność kondensatorów $C = 300$ µF,
- natężenie prądu $I = 2,2$ A.

3. Wyniki i dyskusja

3.1. Analiza mikrostruktury

Analizie mikrostruktury poddano powłoki WC-Co. Do badań mikrostruktury wykorzystano elektronowy mikroskop skaningowy Joel typ JSM-5400.

Na fotografii (rys. 1a) przedstawiono przykładowy widok mikrostruktury powłoki WC-Co, stopowanej elektroiskrowo. W oparciu o uzyskane wyniki stwierdzono, że grubość uzyskanych warstw wyniosła od 20÷30 µm, natomiast zasięg strefy wpływu ciepła (SWC) w głąb materiału podłoża, ok. 15÷20 µm. Na przedstawionej fotografii mikrostruktury, widoczna jest wyraźna granica pomiędzy powłoką, a podłożem, oraz można zaobserwować pory i mikropełknięcia.

Analiza liniowa (rys. 1b) powłoki WC-Co, wykazała nierównomierny rozkład pierwiastków w tej powłoce. Można wyróżnić strefy, w których występują znaczne ilości W, Co oraz Fe. Ponadto na wykresie rozkładu liniowego powłoki WC-Co, widoczne są ślady połączenia dyfuzyjnego powłoki z podłożem. W badanej powłoce brak jest wyraźnie widocznej segregacji składników. Analizując wykres rozkładu liniowego powłoki WC-Co (rys. 1b), obserwuje się zwiększoną zawartość węgla, w ukształto-

The surface layer is constituted at locally high temperature and high pressure. The main parameters during electro discharge machining were [3]:

- the pressure of the shock wave generated by an electric discharge - $(2-7)10^3$ GPa,
- the temperature - $(5-40)10^3$ °C.

Nowadays various electrospark alloying methods are applied in technological processes. A surface layer constituted in this way is characterized by a complex geometric structure.

2. Materials and process parameters

In the experiment, the coatings were electrospark deposited on hammer faces made of carbon steel C45 - the cathode - using a WC-Co (97% WC and 3% Co) electrode with a cross-section of 3 x 4 mm - the anode. The chemical composition of C45 carbon steel is presented in Table 1.

The equipment used for electrospark alloying was an EIL-8A model. Basing on the results of previous investigations as well as instructions given by the producer, the following parameters were assumed to be optimal for ESA:

- voltage, $U = 230$ V,
- capacitor volume, $C = 300$ µF,
- current intensity, $I = 2.2$ A.

3. Results and discussion

3.1. Microstructure analysis

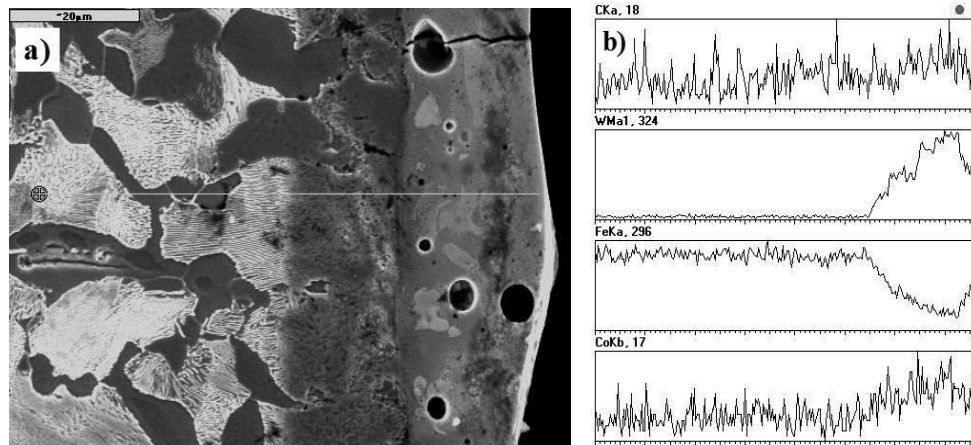
A microstructure analysis was conducted for WC-Co coatings using a Joel JSM-5400 scanning electron microscope. Figure 1a shows a selected view of the surface microstructure of an electrospark deposited WC-Co coating. The thickness of the surface layer was 20÷30 µm, whereas the heat affected zone ranged approximately 15÷20 µm. As can be seen from this figure, there is a clear boundary between the coating and the base material. The coating possesses pores and microcracks.

The linear analysis of the WC-Co coating (Fig. 1b) shows that there is no uniform distribution of the elements. It is possible to distinguish zones with considerable amounts of W, Co, and Fe. Moreover, in the diagram of the linear distribution of the WC-Co coating, one can notice traces of a diffusive interaction between the coating and the base material. In the coating, there is no clear segregation of components. The content of carbon in the electrospark deposited WC-Co coating is higher. It is an example of up-hill diffusion, which involves carbon travelling from the base material - steel C45 - into the electrospark deposited outer layer, this being a result of a thermal interaction.

Tab. 1. Skład chemiczny stali C45

Tab. 1. Chemical composition of C45 carbon steel

Pierwiastki Elements	C	Mn	Si	P	S
Zawartość % Content %	0,42÷0,50	0,50÷0,80	0,10÷0,40	0,04	0,04



Rys. 1. Mikrostruktura i rozkład liniowy pierwiastków w powłoce WC-Co nalożonej elektroiskrowo
 Fig. 1. Microstructure and linear distribution of elements in the electrospark deposited WC-Co coating

wanej obróbką elektroiskrową powłoce. Jest to przykład dyfuzji wstępującej, która polegała na przemieszczaniu się z materiału podłoża (stali 45) węgla (w wyniku oddziaływań cieplnych) do kształtowanej elektroiskrowo technologicznej warstwy powierzchniowej (TWP).

3.2. Pomiary mikrogeometrii

Jedną z głównych wad powłok naniesionych obróbką elektroiskrową, jest ich duża chropowatość końcowa. Dotychczas przeprowadzone badania oraz analiza literatury wykazują, że kształtowanie powierzchni zachodzi w wyniku nakładania się na siebie kraterów będących wynikiem erozji podłoża jak również grzbietów utworzonych z przemieszczających się na powierzchnię cząstek materiału powlekającego elektrody. Tak powstała powierzchnia, posiada szereg następujących cech: regularność, brak kierunkowości, duże promienie zaokrąglenia wierzchołków mikronierówności. W wielu opracowaniach naukowych analizuje się wpływ parametrów procesu na chropowatość powierzchni. Sterując tymi parametrami można uzyskać zakładane zmiany mikrogeometrii powierzchni. Jest to zatem sposób na wytwarzanie powierzchni o zadanej rozwiniętej powierzchni chropowatej, zwanej reliefem powierzchniowym.

Pomiary chropowatości przeprowadzono w Laboratorium Pomiarów Wielkości Geometrycznych Politechniki Świętokrzyskiej, za pomocą przyrządu TALYSURF 4, przy wykorzystaniu programu SUFORM.

Pomiary chropowatości powłok WC-Co, wykonano w dwóch prostopadłych do siebie kierunkach. Pierwszy pomiar, był wykonany zgodnie z ruchem przemieszczania się elektrody, natomiast drugi pomiar, był prostopadły do ściegów skanujących. Z dwóch pomiarów, obliczono wartość średnią parametru Ra, dla danej powłoki. Powłoki WC-Co, posiadały chropowatość $Ra = 1,55 \div 2,07 \mu\text{m}$. Próbkę (bijaki stalowe) ze stali C45, na które nanoszono powłoki, miały chropowatość $Ra = 0,42 \div 0,58 \mu\text{m}$. Przykładowy protokół pomiarów parametrów mikrogeometrii badanych próbek, przedstawiono na rysunku 2.

3.3. Pomiary mikrotwardości

Pomiary mikrotwardości wykonano metodą Vickersa, stosując obciążenie 40 G. Odciski penetratorem wykonano na zglądach prostopadłych w trzech strefach: w powłoce (war-

3.2. Microgeometry measurements

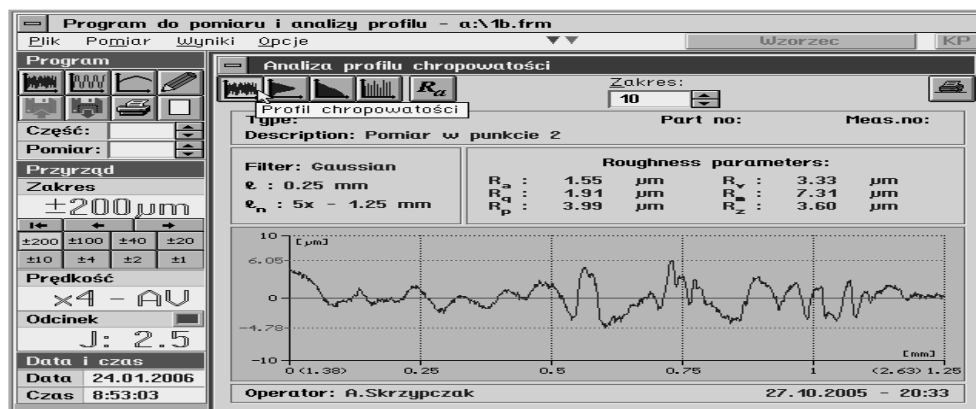
One of the main disadvantages of the coatings produced by electrospark alloying is high roughness of the finished surface. By reviewing the literature and analyzing the latest developments in this technology, one can notice that the surface generation process involves erosion of the base material and formation of microcraters and ridges by the particles leaving the electrode. The surface is regular with rounded microroughness peaks. The effect of the process parameters on the formation of surface roughness has been described in numerous publications. By controlling these parameters, it is possible to obtain surfaces with pre-determined microgeometry. Electrospark alloying allows producing surfaces with enhanced roughness called surface relief.

The roughness of the WC-Co coatings was measured at the Laboratory for Measurement of Geometric Quantities of the Kielce University of Technology using a Talysurf 4 equipped with SUFORM program.

The roughness was measured in two directions perpendicular to each other. Then, the average value was calculated: $Ra = 1.55 \div 2.07 \mu\text{m}$. Before the coating deposition, the specimens – the beaters made of C45 steel - had a roughness of $0.42 \div 0.58 \mu\text{m}$. Figure 2 presents an example microgeometry measurement protocol.

3.3. Microhardness tests

The microhardness of the specimens with WC-Co coatings was analyzed applying a load of 40 G and using the Vickers method. The indentation was made consecutively in three zones:



Rys. 2. Przykładowe wyniki pomiarów parametrów mikrogeometrii dla powłoki WC-Co nałożonej elektroiskrowo na bijak stalowy
 Fig. 2. Surface microgeometry of the WC-Co coating deposited on the steel beater

stwie białej) oraz w strefie wpływu ciepła (SWC), jak również w materiale rodzimym. Wyniki pomiarów mikrotwardości dla powłok elektroiskrowych WC-Co, przedstawiono w tabeli 2. Zastosowanie obróbki elektroiskrowej spowodowało zmiany mikrotwardości, w obrabianym materiale.

Tab. 2. Wyniki pomiarów mikrotwardości powłoki WC-Co
 Tab. 2. Results of the microhardness tests for the WC-Co coating

Mierzone strefy / Measured zones	Mikrotwardość / Microhardness HV _{0,04}			Wartość średnia / Mean value HV _{0,04}
	Numer pomiaru / Measurement number			
	1	2	3	
Warstwa biała / Coating	610	623	618	617
SWC / HAZ	412	404	399	405
Materiał rodzimy / Substrate	341	363	346	350

Mikrotwardość materiału podłoża, po obróbce elektroiskrowej, wynosiła średnio około 350 HV_{0,04} (taka samą wartość mikrotwardości miał materiał w stanie wyjściowym). Nakładając obróbkę elektroiskrową powłoki WC-Co, uzyskano znaczny wzrost mikrotwardości, w stosunku do mikrotwardości materiału podłoża. Powłoka WC-Co posiadała średnią mikrotwardość 617 HV_{0,04} (nastąpił wzrost mikrotwardości średnio o 176% w stosunku do mikrotwardości materiału podłoża). Mikrotwardość SWC po obróbce elektroiskrowej wzrosła o 152% w stosunku do mikrotwardości materiału podłoża.

3.4. Badania odporności na zużycie

Do badań wykorzystano bijaki (próbki) stalowe, wykonane ze stali C45 (rys. 3). Przygotowano osiemnaście bijaków, dziewięć próbek do naniesienia powłoki obróbką elektroiskrową i dziewięć próbek bez naniesienia powłoki. Na rysunku 4 przedstawiono widoki powierzchni roboczych bijaków.

Na początku, wszystkie próbki zostały zważone, następnie na dziewięć bijaków, naniesiono powłokę z WC-Co. Umocnieniu podlegały tylko krawędzie robocze bijaków.

Próbki z naniesioną powłoką, zostały ponownie zważone. W następnym etapie, osiemnaście bijaków zamontowano w młynie młotkowym, który znajduje się w firmie EKOFIBER (rys. 5). Wszystkie bijaki zostały symetrycznie rozmieszczone na wale roboczym młyna i pracowały przez około 250 godzin

the coating, the heat affected zone (HAZ) and the base material. The results are given in Table 2. The process of electrospark alloying resulted in certain changes in the material structure.

The average microhardness of the base material after ESA was 350HV_{0.04}. The value was the same as that at the initial state. The average microhardness of the WC-Co coating was 617HV_{0.04}. Thus, there was a 176 percent increase compared to that of the base material. The microhardness of the heat affected zone after electrospark alloying was 152 % higher in relation to that of the base material.

3.4. Wear resistance

The tests were conducted for beaters made of C45 steel (Fig. 3). There were eighteen specimens measured: nine with electrospark deposited WC-Co coatings and nine uncoated ones. Their working surfaces are presented in Fig. 4.

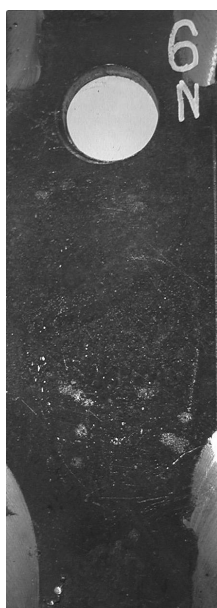
All the specimens were weighed for the first time before the tests. Then, nine of them were coated with WC-Co and weighed again. It should be noted that only the working surfaces were strengthened. The next stage involved mounting the beaters in a hammer mill operating in Nordiska Ekofiber Polska Ltd. (Fig. 5). The eighteen beaters were placed symmetrically along the mill shaft. After 250 hours of operation, all of them were weighed again. The data are shown in Tables 3 and 4.

Tabela 3. Masa bijaków z powłoką WC-Co
Table 3. Mass of the beaters with WC-Co coatings

Nr. Próbk Specimen number	Numer pomiaru Measurement number			Ubytek masy Mass loss [g]
	I [g]	II [g]	III [g]	
N 1	927,93	927,77	927,66	0,110
N 2	957,6	957,62	957,21	0,410
N 3	959,45	959,45	958,98	0,470
N 4	956,58	956,52	955,97	0,550
N 5	967,83	967,72	967,47	0,250
N 6	950,28	950,27	949,98	0,290
N 8	926,77	926,8	926,44	0,360
N 9	953,87	953,83	953,71	0,120
Średnia / average value				0,320

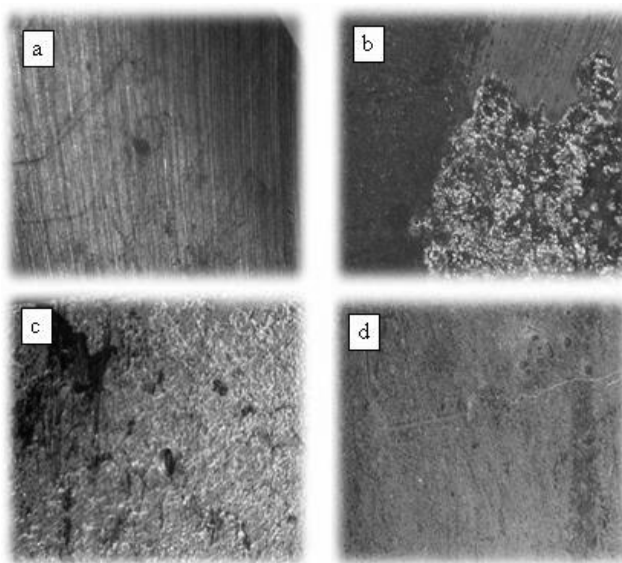
Tabela 4. Masa bijaków bez powłoki
Table 4. Mass of the beaters without coatings

Nr. Próbk Specimen number	Numer pomiaru Measurement number		Ubytek masy Mass loss [g]
	I [g]	II [g]	
A 1	928,82	928,59	0,230
A 2	954,34	953,74	0,600
A 3	939,33	938,71	0,620
A 4	950,58	949,85	0,730
A 5	963,78	963,13	0,650
A 6	927,25	926,89	0,360
A 8	935,8	935,45	0,350
A 9	951,92	951,659	0,261
Średnia / average value			0,475



Rys. 3. Przykładowy nieużyty bijak przed nałożeniem powłoki WC-Co

Fig. 3. Working surface of an unworn specimen before the deposition of a WC-Co coating



Rys. 4. Powierzchnia robocza bijaka (pow. 20x): a) przed nałożeniem powłoki elektroiskrowej, b) z naniesioną elektroiskrowo powłoką WC-Co, c) z naniesioną elektroiskrowo powłoką WC-Co po pracy w młynie, d) bez naniesionej elektroiskrowo powłoki po pracy w młynie

Fig. 4. Working surface of a beater (magnification 20x): a) before electrospark alloying, b) with an electrospark deposited WC-Co coating, c) with an electrospark deposited WC-Co coating after operation in the mill, d) without an electrospark deposited WC-Co coating after operation in the mill

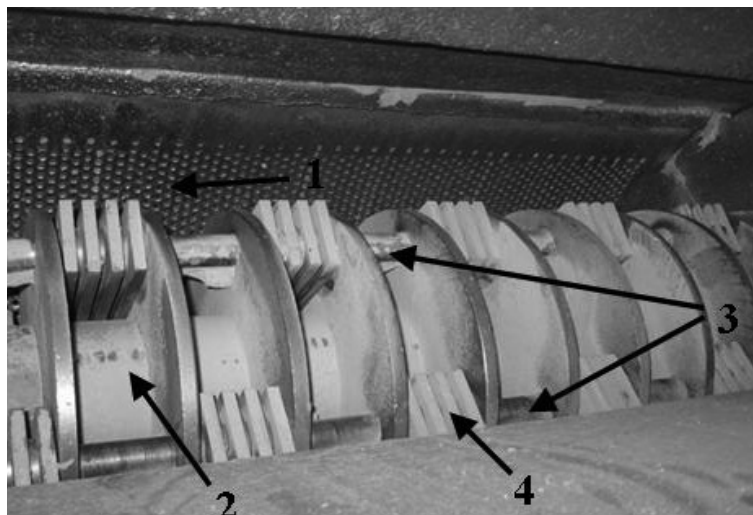
roboczych. Następnie wszystkie próbki zostały powtórnie zważone. Wyniki badań zestawiono w tabelach 3 i 4.

W tabeli 3, przedstawiono wyniki pomiarów, grupy bijaków, przeznaczonych do naniesienia powłoki WC-Co. W kolumnie I przedstawiono masę bijaków przed nałożeniem powłoki, w kolumnie II przedstawiono masę bijaków z powłoką WC-Co, naniesioną elektroiskrowo, natomiast w kolumnie III masę bijaków po 250 h pracy w młynie. Tabela 4 zawiera wyniki pomiarów masy bijaków bez powłoki WC-Co (kolumna I), natomiast kolumna II zawiera wyniki pomiarów masy tych samych bijaków po 250 h pracy w młynie.

Table 3 presents measurement results for the specimens with WC-Co coatings. Column I shows the mass of the beaters before electrospark alloying; in column II we have the mass of the beaters with electrospark deposited WC-Co coatings, and in column III the mass of the beaters after 250h of operation in the mill. Table 4 contains results for the uncoated specimens before use (column I), and after 250 hours of operation in the mill (column II).

Tables 3 and 4 omit results for specimens numbered 7, because their mass was difficult to distribute along the mill shaft, i.e. impossible to counterbalance.

The mass loss analysis showed that the beaters with the WC-Co coatings had a lower wear rate than the uncoated be-



Rys. 5. Widok wnętrza młyna do mielenia makulatury: 1- sito, 2- wał główny, 3- sworznie mocujące, 4- bijaki
 Fig. 5. A view of the inside of the mill for waste paper grinding: 1- sieve, 2- main shaft, 3- fixing pivots, 4- beaters

W tabeli 3 i 4 nie uwzględniono próbek oznaczonych numerem 7, ze względu na problem, z rozmieszczeniem masy na wale młyna (były one nie do zrównoważenia).

Analizując uzyskane wartości ubytku masy poszczególnych bijaków możemy zauważyć, że bijaki z naniesioną powłoką WC-Co, wykazują mniejsze zużycie, w odniesieniu do bijaków bez tej powłoki. Normalny cykl pracy bijaków wynosi około 2-3 lata. We wstępnym etapie badań, nie można wyciągać pochopnych wniosków, co do poprawy odporności na zużycie bijaków (poprzez nałożenie powłoki WC-Co) w tak krótkim okresie eksploatacyjnym. Badania nad zużyciem bijaków z powłoką WC-Co są nadal kontynuowane.

5. Wnioski

- Analizując mikrostrukturę stwierdzono, że grubość powłok wyniosła od 20÷30 μm , natomiast zasięg strefy wpływu ciepła, w głąb materiału podłoża, ok. 15÷20 μm . Ponadto powłoki posiadały mikropęknięcia oraz pory.
- Powłoki WC-Co naniesione elektroiskrowo charakteryzowały się znacznym wzrostem chropowatości Ra, w stosunku do chropowatości materiału podłoża. Wzrost chropowatości nie zawsze jest wadą, w pewnych przypadkach chropowata powierzchnia może być wykorzystana jako zasobnik smaru, do intensyfikacji wymiany ciepła oraz katalizy.
- W wyniku obróbki elektroiskrowej otrzymano powłokę WC-Co o średniej mikrotwardości 617 $\text{HV}_{0,04}$, podczas gdy mikrotwardość materiału podłoża (stali C45) wynosiła 350 $\text{HV}_{0,04}$.
- Przeprowadzone w rzeczywistych warunkach pracy badania odporności na zużycie bijaków stalowych wykazały wzrost ich odporności na zużycie, z naniesioną powłoką WC-Co, w odniesieniu do bijaków bez powłoki.
- Dalszy etap badań będzie ukierunkowany na wytworzeniu elektrod typu WC-Co- Al_2O_3 oraz WC-Co-SiC, a następnie na naniesieniu nimi powłok obróbką elektroiskrową na bijaki oraz sprawdzeniu ich odporności na zużycie w dłuższym okresie eksploatacyjnym.

aters. The latter are predicted to operate for approximately 2-3 years. The investigations will be continued as there is not enough data confirming that the application of WC-Co coatings improves the long-term wear resistance of beaters.

4. Conclusions

- The microstructure analysis revealed that the coating thickness was 20÷30 μm , whereas the heat affected zone ranged approximately 15÷20 μm . The coatings possessed microcracks and pores.
- A significant increase in roughness Ra was reported for specimens with WC-Co coatings. Higher roughness, however, is not always considered a disadvantage. Under certain circumstances, valleys in the roughness profile act as lubricant reservoirs, which increases the rate of heat transfer and that of catalysis.
- The microhardness of the WC-Co coating produced by electrospark alloying was 617HV0.04, while that of the base material - C45 steel - was 350HV0.04.
- The durability of beaters was studied under real conditions; the specimens with WC-Co coatings were reported to be more wear resistant than the uncoated ones.
- Further research will be targeted at determining the long-term wear resistance of beaters with WC-Co- Al_2O_3 and WC-Co-SiC coatings produced by electrospark alloying.

6. References

1. Agarwal A, Dahotre N. Pulse electrode deposition of superhard boride coatings on ferrous alloy. *Surface & Coatings Technology* 1988; 106: 242-250.
2. Kaczmarek J. O wpływie obróbki ścierniej i niektórych innych technologii na magazynowanie energii w materiale obrobionym. *Postępy Technologii* 1998; 22: 35÷52.
3. Miernikiewicz A. Doświadczalno-teoretyczne podstawy obróbki elektroerozyjnej (EDM). Kraków: Politechnika Krakowska, Rozprawy, nr 274, 2000.
4. Radek N. Tworzenie powłok o zróżnicowanych własnościach wybranymi technologiami: elektroiskrową i laserową. Kielce: Politechnika Świętokrzyska, Praca doktorska, 2006.
5. Radek N. Obróbka elektroiskrowa - urządzenia i zastosowania przemysłowe. *Mechanik* 2008; 7: 600-602.
6. Radek N, Wajs E, Luchka M. The WC-Co electrospark alloying coatings modified by laser treatment. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics* 2008; 47 (3-4): 197-201.
7. Radek N. Experimental investigations of the Cu-Mo and Cu-Ti electro-spark coatings modified by laser beam. *Advances in Manufacturing Science and Technology* 2008; 32(2): 53-68.
8. Ribalko A V, Sahin O. The use of bipolar current pulses in electro spark alloying of metal surfaces. *Surface & Coatings Technology* 2003; 168: 129-135.

Dr inż. Norbert RADEK

Centrum Laserowych Technologii Metali
Politechnika Świętokrzyska
Aleja 1000-lecia P.P. 7
25-314 Kielce, Polska
e-mail: norrad@tu.kielce.pl
