

Porównanie odporności na zużycie ścierne płyt trudnościeralnych

Comparison of abrasion resistance of wear plates

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących porównania odporności na zużycie ścierne kilku różnych płyt trudnościeralnych produkowanych przez producentów krajowych i zagranicznych w technologiach automatycznego napawania łukowego drutem proszkowym (FCAW), ręcznego napawania łukowego elektrodami otulonymi (MMAW) oraz spajania metalurgicznego stalowej płyty podkładowej z żeliwem stopowym o wysokiej odporności na ścieranie. W oparciu o wyniki badań odporności na zużycie ścierne prowadzone zgodnie z normą ASTM G65-00 względem materiału referencyjnego stali Hardox 400 oraz pomiar twardości warstw roboczych materiałów trudnościeralnych wg PN-EN ISO 6508-1:2016, wytypowano produkty o najlepszych parametrach użytkowych do zastosowań w aplikacjach narażonych na silne zużycie ścierne typu metal-minerał.

Słowa kluczowe: ścieranie; tribologia; napawanie; FCAW; MMAW; zużycie

Abstract

In this article results of abrasive wear resistance of a few different steel wear plates made by domestic and foreign producers in technology of automatic FCAW and manual arc (MMAW) cladding and metallurgical bonding of wear resistant layer with base material were presented. Based on abrasive wear resistance tests according to ASTM G65-00, in regard to reference samples from Hardox 400 steel and hardness measurements according to PN-EN ISO 6508-1:2016 standard, products with best performance parameters on metal-mineral abrasion conditions were chosen.

Keywords: abrasion; tribology; cladding; FCAW; MMAW; wear

Wstęp

Opracowywanie oryginalnych składów chemicznych i technologii wytwarzania materiałów nowej generacji, które pozwalałyby na intensywne i długotrwałe użytkowanie części maszyn i urządzeń w warunkach intensywnej eksploatacji jest konieczne, szczególnie biorąc pod uwagę względy ekonomiczne [1]. Obecnie producenci oferują szeroki asortyment materiałów w postaci blach, płyt oraz rur odpornych na mechanizmy zużycia np. ścieranie, erozję, korozję, zmęczenie itp. Często różne mechanizmy zużycia są ze sobą wzajemnie powiązane, a siła ich oddziaływania zależy nie tylko od warunków środowiskowych miejsca pracy części maszyny lub urządzenia, ale także od rodzaju i parametrów obciążenia [2÷9].

Z tego względu, wybór właściwego materiału konstrukcyjnego spełniającego założone kryteria użytkowe jest trudny i wymaga szczegółowej analizy, a niekiedy również modyfikacji istniejących rozwiązań zabezpieczających powierzchnie przed zużyciem. Odporność na zużycie i szczególne właściwości materiałów uzyskiwane są dzięki specjalnemu i złożonemu procesowi produkcyjnemu, co sprawia, że mogą być one stosowane między innymi w takich gałęziach

przemysłu jak: energetyka, budownictwo, górnictwo i metalurgia, do produkcji części maszyn i urządzeń eksploatowanych w szczególnie trudnych warunkach pracy, np. elementów kruszarek, rozdrabniaczy i mieszadeł, czepaków i krawędzi roboczych maszyn do robót ziemnych, ślimaków przenośników śrubowych, podajników, skipów, lei i rynien zsypanych, rurociągów przesyłowych itp.

Materiały trudnościeralne to specjalne stopy o twardości zbliżonej do diamentu, a przy tym spawalne i odporne na obciążenia udarowe. Współcześnie wytwarzane stale trudnościeralne (wysokojakościowe stale odporne na ścieranie np. Hardox, Hardstal, Miilux, HTK), dzięki wysokiej czystości metalurgicznej, wyróżniają się wysoką wytrzymałością mechaniczną, dobrą spawalnością, a także podatnością do przeróbki plastycznej i dostateczną skrawalnością. Jednakże koszty wytwarzania i zakupu tych stali nadal są wysokie.

Atrakcyjną alternatywę dla tego typu materiałów konstrukcyjnych stanowią prefabrykaty odporne na zużycie w postaci płyt trudnościeralnych wykonywane najczęściej w technologiach automatycznego napawania łukowego

Dr inż. Artur Czupryński, dr inż. Tomasz Kik – Politechnika Śląska; mgr inż. Marcin Melcer – Messer Eutectic Castolin Sp. z o.o.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: artur.czuprynski@polsl.pl

drutem proszkowym (FCAW), napawania plazmowego proszkowego (PPTAW), ręcznego napawania łukowego elektrodami otulonymi (MMAW) oraz metodami przetapiania proszków w piecach próżniowych lub spajania metalurgicznego płyty podkładowej z trudnościeralną warstwą roboczą z żeliwa stopowego [7].

Jako materiał podstawowy, w zależności od przeznaczenia płyty, stosuje się blachy z różnych gatunków stali, najczęściej łatwo spawalnych stali niestopowych konstrukcyjnych (np. S235 JR+N, S355 JR+N), ale także stali wysokostopowych (np. 1.4301 (316L)). Powierzchnia robocza narażona na zużycie, w zależności od środowiska i warunków pracy, jest napawana materiałami na bazie żelaza z wtrąceniami węglików Cr, Nb, V i W oraz borków, podwyższających odporność na ścieranie. Warstwę napawaną o grubości ok. 50÷80% materiału bazowego uzyskuje się przy użyciu wysokostopowych drutów proszkowych typu Fe-C-Cr lub proszków do napawania plazmowego gatunku Ni-Cr-Si. Poprzez odpowiedni dobór składu chemicznego i struktury warstwy wierzchniej można wydłużyć żywotność płyt trudnościeralnych, a tym samym zwiększyć efektywny czas pracy urządzeń mechanicznych. Możliwa do uzyskania odporność na ścieranie, w przypadku zastosowania napawanych warstw wierzchnich ze złożonymi fazami węglowymi o twardości 1500÷3000 HV w porównaniu z popularnymi materiałami odpornymi na ścieranie jest od kilku do nawet kilkunastu razy większa. Płyty odporne na zużycie są nowoczesnym i ekonomicznym rozwiązaniem stosowanym podczas regeneracji zużytych podzespołów maszyn, a także w produkcji nowych części charakteryzujących się wysoką odpornością na zużycie ścierne i erozję. Główną zaletą tych płyt jest możliwość regeneracji dużych zużytych powierzchni, szczególnie w przypadkach, gdy masa konstrukcji nie jest najważniejszym parametrem roboczym. Gotowe płyty trudnościeralne mogą być cięte plazmowo na różne kształty i formowane przez zginanie lub walcowanie w celu wytworzenia fragmentów wyściółki lub części maszyny. W zależności od rodzaju obciążenia, jakiemu poddawane są elementy wykonane z płyty odpornej na zużycie, mocuje się je do regenerowanych części z wykorzystaniem technologii spawania za pomocą ciągłych lub przerywanych spoin pachwinowych, klei przy użyciu kompozytów żywiczno-metalicznych,

a także po uprzednim wypaleniu otworów przykręca lub nituje. Dzięki ich zastosowaniu uzyskuje się znaczące oszczędności wynikające z redukcji kosztów materiałowych oraz skrócenia czasu przerw w produkcji, potrzebnego na wymianę zużytych części na nowe [1÷9].

Przebieg badań

Materiały

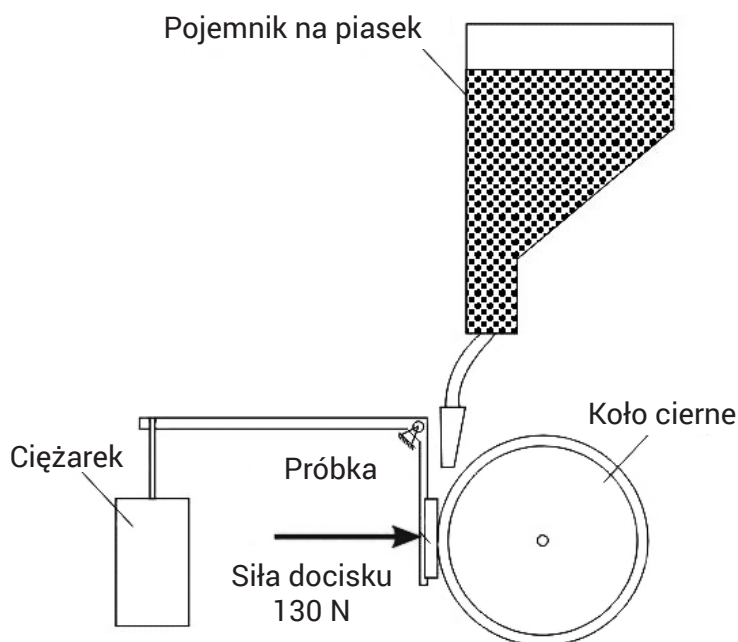
Celem badań było określenie odporności na zużycie ścierne kilku powszechnie stosowanych w przemyśle materiałów trudnościeralnych produkcji krajowej i zagranicznej. Właściwości stalowych płyt odpornych na zużycie ścierne, z warstwami wierzchnimi wykonanymi w procesie napawania łukowego metodami FCAW i MMAW oraz komponentu dwuwarstwowego spawanego metalurgicznie, porównano z materiałem referencyjnym w postaci stali Hardox 400 (tabl. I).

Badania odporności na zużycie ścierne warstwy roboczej materiału trudnościeralnego

Badania odporności na zużycie ścierne typu metal-minerał warstw roboczych płyt trudnościeralnych wykonanych w technologii napawania łukowego, elementu z warstwą roboczą wykonaną z żeliwa chromowo-molibdenowego (AbrecoPlate) oraz materiału referencyjnego (stali Hardox 400) przeprowadzono zgodnie z normą ASTM G 65-00, Procedura A [17]. Próbę wykonano na stanowisku badawczym przedstawionym na rysunku 1.

W celu przeprowadzenia prób ścieralności z wytypowanych materiałów trudnościeralnych wycięto po dwie próbki o wymiarach 75 x 25 x 10 mm. Podczas próby koło cierne wykonało 6000 obrotów, a natężenie przepływu ścierniwa (piasku A. F. S. Testing Stand 50-70) wynosiło 335 g/min (rys. 2).

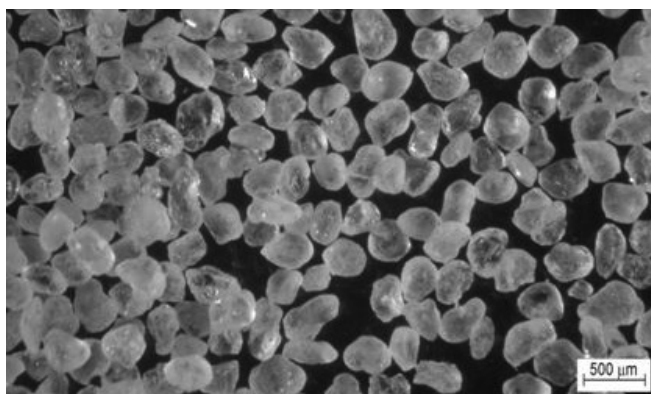
Przed i po próbie ścieralności próbki ważono na wadze laboratoryjnej z dokładnością do 0,0001 g. Średnią gęstość stali Hardox 400, napoin płyt trudnościeralnych oraz warstwy roboczej wykonanej z chromowo-molibdenowego żeliwa białego materiału AbrecoPlate, wyznaczono przy użyciu wagi laboratoryjnej, na podstawie trzech pomiarów gęstości



Rys. 1. Stanowisko do badań odporności na zużycie ścierne typu metal-minerał przeprowadzonych zgodnie z normą ASTM G 65-00, Procedura A
Fig. 1. Metal-mineral wear resistance test stand – according to ASTM G65-00, Procedure A standard

Tablica I. Materiały odporne na zużycie ściernie
Table I. Wear resistant materials

Producent i nazwa handlowa materiału trudnościeralnego (pierwiastki stopowe) twardość, HRC	Opis badanego materiału
<p><u>Contex</u> – Alphachrom 7000 (C, Cr, Fe) 64÷67 HRC</p>	<p>Płyta trudnościeralna wykonana w technologii napawania łukowego drutem proszkowym z warstwą roboczą o strukturze bogatej w twarde węgliki chromu równomiernie rozprowadzone w osnowie żelaza α. Płyta odporna na erozję, ścieranie, uderzenia, wysoką temperaturę, korozję i działanie czynników chemicznych. Nadaje się do spawania, cięcia plazmowego oraz formowania poprzez walcowanie i gięcie na prasach [10]</p>
<p><u>CeraMetal</u> – HCNb (C, Cr, Nb, Fe) 60÷64 HRC</p>	<p>Płyta trudnościeralna z napawaną łukowo drutem proszkowym warstwą roboczą o strukturze austenitycznej z wydzieleniem węglików chromu i niobu. Stosowana w aplikacjach wymagających bardzo wysokiej odporność na ścieranie, szczególnie typu metal-metal, wyższej temperatury pracy oraz średniej odporności na obciążenia udarowe. Stosowana na łopaty i komponenty mieszadeł oraz walcarek, a także leje, rynny zsypane itp. Nadaje się do spawania oraz formowania poprzez cięcie plazmowe, walcowanie i gięcie na prasach [11]</p>
<p><u>CeraMetal</u> – HCCr (C, Cr, Fe) 58÷62 HRC</p>	<p>Płyta trudnościeralna z napawaną łukowo drutem proszkowym warstwą roboczą o strukturze austenitycznej z wydzieleniem bardzo twardych węglików chromu (Cr_7C_3 – 1730 HV) w stężeniu >50%. Stosowana w środowisku pracy od którego wymaga się wysokiej odporności na ścieranie oraz średniej odporności na uderzenia. Może pracować w temperaturze nawet powyżej 500 °C. Stosowana na łopaty i części mieszadeł oraz walcarek, a także rury, zgarniarki itp. Płyta nadaje się do spawania oraz formowania poprzez cięcie plazmowe, walcowanie i gięcie na prasach [11]</p>
<p><u>Kalenborn</u> – Kalmetall W 150 FD (C, Cr, B, W, V, Fe) 65 HRC</p>	<p>Płyta trudnościeralna wykonana w technologii napawania łukowego drutem proszkowym z rdzeniem topnikowym składającym się z: C, Cr, B, W, V tworzącym stopiwo o bardzo twardej strukturze martenzytyczno-węglkowej. Warstwa robocza charakteryzuje się wysoką odpornością na ścieranie w temperaturze do 350 °C. Może być stosowana na części maszyn i urządzeń pracujące w przemyśle ceglarskim, a także do zabezpieczania ślimaków przenośników śrubowych transportujących piasek i glinę [12]</p>
<p><u>Castolin</u> – CDP 4624 (C, Cr, Mn, Si, Fe) 57÷60 HRC</p>	<p>Płyta trudnościeralna z napawaną łukowo warstwą roboczą o strukturze zawierającej powyżej 30% twardych węglików chromu (1800÷2000 HV). Stosowana głównie do ochrony części maszyn i urządzeń technologicznych przed ścieraniem materiałami mineralnymi oraz zabezpieczenie przed zużyciem erozyjnym pyłoprzewodów, urządzeń odpylających, wentylatorów itp. Może pracować w temperaturach do ok. 250 °C oraz warunkach niewielkiego udaru. Nadaje się do spawania, formowania poprzez cięcie plazmowe, walcowanie i gięcie na prasach [13]</p>
<p><u>Castolin</u> – CDP 4666 (C, Cr, Nb, B, Fe) 62÷65 HRC</p>	<p>Płyta trudnościeralna z napawaną łukowo drutem proszkowym z warstwą roboczą zawierającą powyżej 50% węglika chromu Cr_7C_3 oraz dodatkowo węgiel niobu NbC i borek chromu Cr_2B, odznaczająca się wyjątkową odpornością na ścieranie i erozję. Obszar zastosowania podobny jak w przypadku płyty CDP 4624. Może pracować w temperaturach do ok. 400 °C oraz warunkach niewielkiego udaru. Nadaje się do spawania oraz formowania poprzez walcowanie i gięcie na prasach [13]</p>
<p><u>SIJ Elektrode</u> – Abradur 64 (C, Cr, Nb, Fe) 62÷65 HRC</p>	<p>Płyta trudnościeralna wykonana w technologii ręcznego napawania łukowego metodą MMAW grubo otuloną elektrodą Abradur 64 z warstwą roboczą odporną na zużycie ściernie i umiarkowane obciążenia udarowe. Warstwa napawana szczególnie zalecana do zabezpieczania ślimacznicy i zębów czerpaków koparek [14]</p>
<p><u>Castolin</u> – EnDOTec® DO*390N (Fe, C, Si, Mn, Cr, Mo, Nb, W, B) 71 HRC</p>	<p>Płyta trudnościeralna wykonana w technologii napawania łukowego drutem proszkowym z warstwą roboczą charakteryzującą się dużymi, złożonymi i bardzo twardymi frakcjami węglików boru (M23 (BC)), węglików metali (MC) i borków metali (M2 B). Węgliki i borki w skali mikronowej są bardzo silnie zdyspergowane w osnowie żelaza α. Płyta wykazuje wysoką odporność na zużycie ściernie i erozję oraz odznacza się umiarkowaną odpornością na udar. Może pracować w temperaturze do ok. 750 °C [13]</p>
<p><u>Canadian Wear Technologies Ltd.</u> – AbrecoPlate (C, Cr, Mo, Mn, Si, Ni, Fe) 64 HRC</p>	<p>Warstwowy materiał trudnościeralny złożony z twardego i bardzo odpornego na ścieranie chromowo-molibdenowego żeliwa białego, z bazą z surowki srebrzystej-krzemowej metalurgicznie spojenego na całej powierzchni z płytą podkładową ze stali miękkiej, która zapewnia dobrą spawalność i poprawne funkcjonowanie elementu nawet w przypadku pęknięcia warstwy żeliwnej. Materiał trudnościeralny odznaczający się wysoką odpornością na ścieranie, obciążenia udarowe, wilgoć i korozję [15]</p>
<p><u>SSAB Special Steels</u> – Hardox 400 (C, Mn, Mo, Cr, Si, Ni, Fe) 40÷46 HRC</p>	<p>Blacha ze stali trudnościeralnej, przeznaczona do zastosowań wymagających odporność na ścieranie w połączeniu z wysoką udatnością i dobrą podatnością na gięcie i spawanie. Stosowana przy produkcji kruszarek, płyt sitowych, podajników, czopów, krawędzi skrawających, przenośników, łyżek koparek, noży, kół zębatych, wywrotek, ładowarek, wózków przemysłowych, lemieszki spychaczy, rur przesyłowych, przenośników ślimakowych itp. [16]</p>



Rys. 2. Widok ziaren materiału ściernego A. F. S. Testing Sand 50-70 stosowanego w badaniach odporności na ścieranie przeprowadzonych zgodnie z normą ASTM G 65-00, Procedura A

Fig. 2. A view of abrasive material particles A. F. S. Testing Sand 50-70 used in ASTM G65-00, Procedure A wear resistance test

próbek, pobranych z badanych materiałów, ważonych w powietrzu i cieczy (tabl. II). Wykorzystując zmierzoną średnią gęstość trudnościeralnej warstwy roboczej i średni ubytek masy próbki po próbie ścierania zgodnie ze wzorem (1) obliczono objętościowy ubytek masy:

$$\text{Ubytek objętościowy masy [mm}^3\text{]} = \frac{\text{Ubytek masy [g]}}{\text{Gęstość [g/cm}^3\text{]} \times 1000} \quad (1)$$

Uzyskane w ten sposób wyniki odniesiono do odporności na zużycie ścierne stali Hardox 400 wyznaczając względną odporność na zużycie ścierne typu metal-minerał poszczególnych warstw roboczych materiałów trudnościeralnych (tabl. III).

Widok powierzchni próbek po badaniu odporności na zużycie ścierne typu metal-minerał przeprowadzonego zgodnie z normą ASTM G 65-00, Procedura A, przedstawiono na rysunku 3.

Tablica II. Gęstość metalu warstwy roboczej odpornej na zużycie ścierne oraz stali Hardox 400

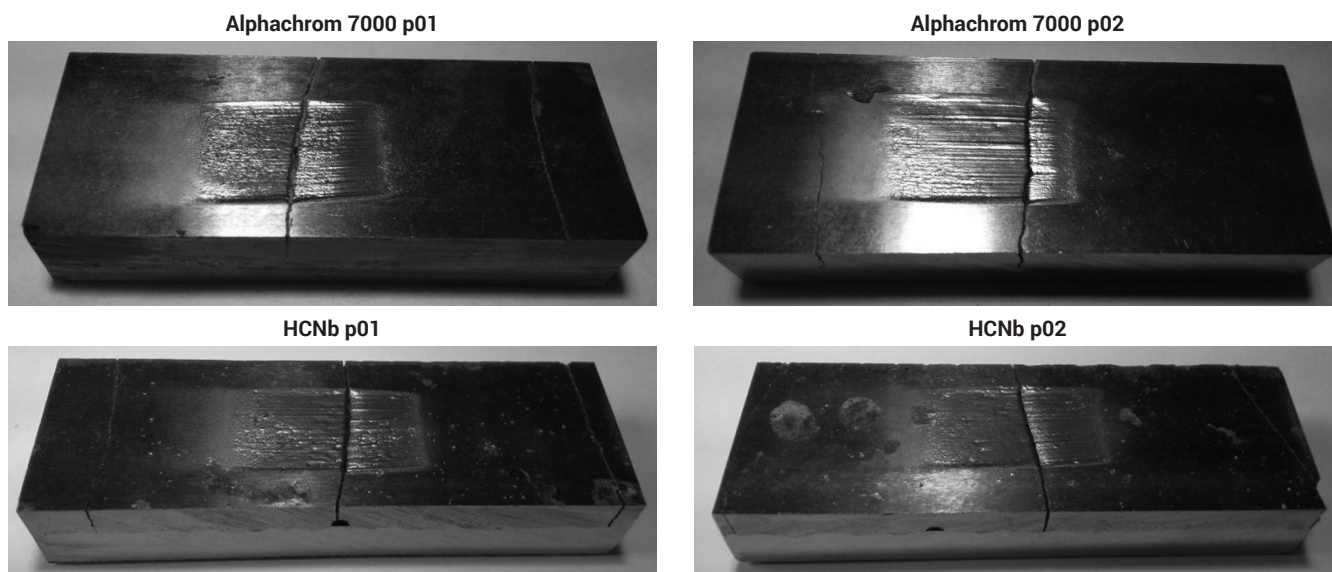
Table II. Density of wear resistant layers metal and Hardox 400 steel

Oznaczenie próbki	Masa próbki ważonej w powietrzu [g]	Masa próbki ważonej w cieczy [g]	Gęstość [g/cm ³]	Średnia gęstość [g/cm ³]
Alphachrom 7000	2,5030	2,1615	7,3119	7,3324
	3,1960	2,7632	7,3670	
	1,8231	1,5745	7,3183	
HCNb	1,4120	1,2204	7,3537	7,3559
	1,2885	1,2192	7,3054	
	2,3742	2,0545	7,4087	
HCCr	1,2825	1,1091	7,3807	7,3756
	1,7063	1,4750	7,3614	
	1,9046	1,6473	7,3846	
W 150 FD	2,0344	1,7638	7,5047	7,4643
	1,1665	1,0103	7,4503	
	0,7120	0,6165	7,4379	
CDP 4624	2,3466	2,0271	7,3287	7,3451
	1,9783	1,7094	7,3419	
	1,6484	1,6484	7,3646	
CDP 4666	1,6544	1,4300	7,3567	7,3644
	1,8742	1,6203	7,3631	
	1,4904	1,2887	7,3735	
Abradur 64	2,1547	1,8537	7,1450	7,1544
	1,7651	1,5191	7,1622	
	1,8936	1,6295	7,1561	
EnDotec DO*390N	2,4378	2,1226	7,7301	7,7208
	1,9345	1,6844	7,7012	
	1,7961	1,5639	7,7312	
AbrecoPlate	1,8836	1,6360	7,6022	7,5961
	1,4717	1,2783	7,5801	
	1,2086	1,0498	7,6001	
Hardox 400	1,2876	1,1203	7,6775	7,7620
	1,4927	1,3031	7,8537	
	1,4863	1,2950	7,7548	

Tablica III. Wyniki badań odporności na zużycie ścierne materiałów trudnościernych w odniesieniu do odporności na ścieranie stali Hardox 400
Table III. Results of wear resistance tests of different material in comparison with Hardox 400 steel wear resistance

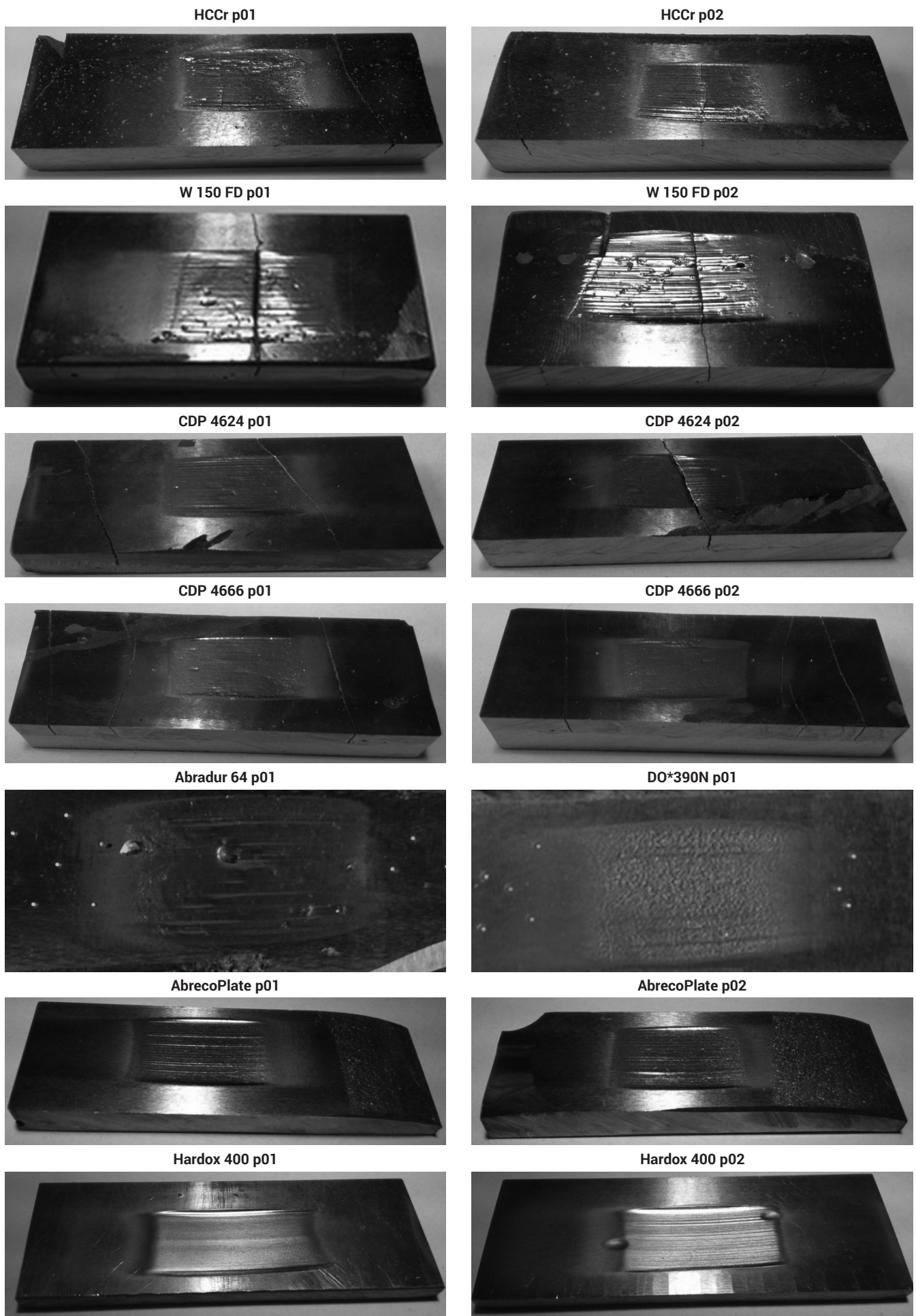
Wyniki próby ścierania								
Oznaczenie próbki	Nr próbki	Masa przed testem [g]	Masa po teście [g]	Ubytek masy [g]	Średni ubytek masy [g]	Gęstość warstwy [g/cm ³]	Ubytek objętościowy [mm ³]	Względna odporność na ścieranie
Hardox 400	p01	62,2260	60,7526	1,4734	1,4744	7,7620	189,9510	1,00
	p02	60,7526	59,2773	1,4753				
Alphachrom 7000	p01	157,5045	157,2509	0,2536	0,2428	7,3324	33,1133	5,74
	p02	157,0426	156,8107	0,2319				
HCNb	p01	174,3838	174,1851	0,1987	0,1981	7,3559	26,9376	7,05
	p02	176,8729	176,6753	0,1976				
HCCr	p01	160,5386	160,3285	0,2101	0,1977	7,3756	26,7978	7,09
	p02	172,0538	171,8686	0,1852				
W 150 FD	p01	87,1791	86,8916	0,2875	0,4041	7,4643	54,1377	3,51
	p02	91,8884	91,3677	0,5207				
CDP 4624	p01	134,0617	133,8487	0,2130	0,2166	7,3451	29,4890	6,44
	p02	134,2440	134,0238	0,2202				
CDP 4666	p01	161,9005	161,7025	0,1980	0,1862	7,3644	25,2769	7,51
	p02	164,5962	164,4219	0,1743				
Abradur 64 ¹⁾	p01	136,2893	136,0933	0,1960	0,1983	7,1544	27,7102	6,86
	p02	139,6675	139,4670	0,2005				
EnDOtec® DO*390N ¹⁾	p01	155,4632	155,3631	0,1001	0,0996	7,7208	12,9000	14,73
	p02	155,8611	155,7620	0,0991				
AbrecoPlate	p01	173,7335	173,6133	0,1202	0,11635	7,5961	15,3170	12,40
	p02	173,6714	173,5589	0,1125				

Uwagi: Wynik odniesiono do próbek wykonanych z płyty stalowej Hardox 400. Siła wywierana na próbki podczas testu wynosiła 130 [N].
¹⁾ Warstwa robocza płyty złożona z napoiiny trójwarstwowej.



Rys. 3. Widok powierzchni próbek po badaniu odporności na zużycie ścierne typu metal-minerał wykonanego wg normy ASTM G 65-00, Procedura A

Fig. 3. A view of the surfaces of different specimens after ASTM G65-00, Procedure A metal-mineral wear resistance tests standards

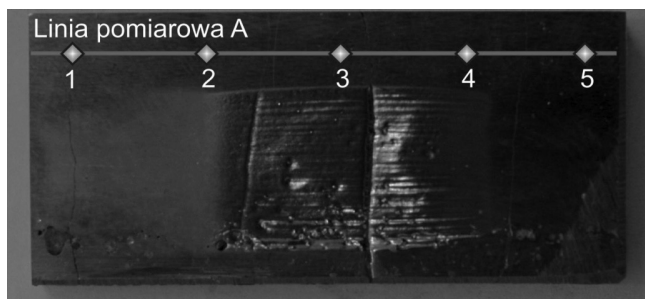


CD. Rys. 3. Widok powierzchni próbek po badaniu odporności na zużycie ścierne typu metal-minerał wykonanego wg normy ASTM G 65-00, Procedura A

Cont. Fig. 3. A view of the surfaces of different specimens after ASTM G65-00, Procedure A metal-mineral wear resistance tests standards

Pomiary twardości warstwy roboczej materiału trudnościeralnego przeprowadzone sposobem Rockwella

Pomiaru twardości warstwy roboczej materiału trudnościeralnego oraz materiału referencyjnego w postaci stali Hardox 400 przeprowadzono sposobem Rockwella na przeszlifowanej powierzchni próbki. Badanie przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 6508-1:2016-10 [18]. Wykonano po pięć pomiarów wzdłuż jednej linii pomiarowej umiejscowionej poza obszarem wytarcia próbki (rys. 4). Wyniki pomiarów przedstawiono w tablicy IV.



Rys. 4. Przykład rozmieszczenia punktów pomiarowych na powierzchni próbki warstwy roboczej materiału trudnościeralnego
Fig. 4. An example of measurement points on the wear resistant layer surface

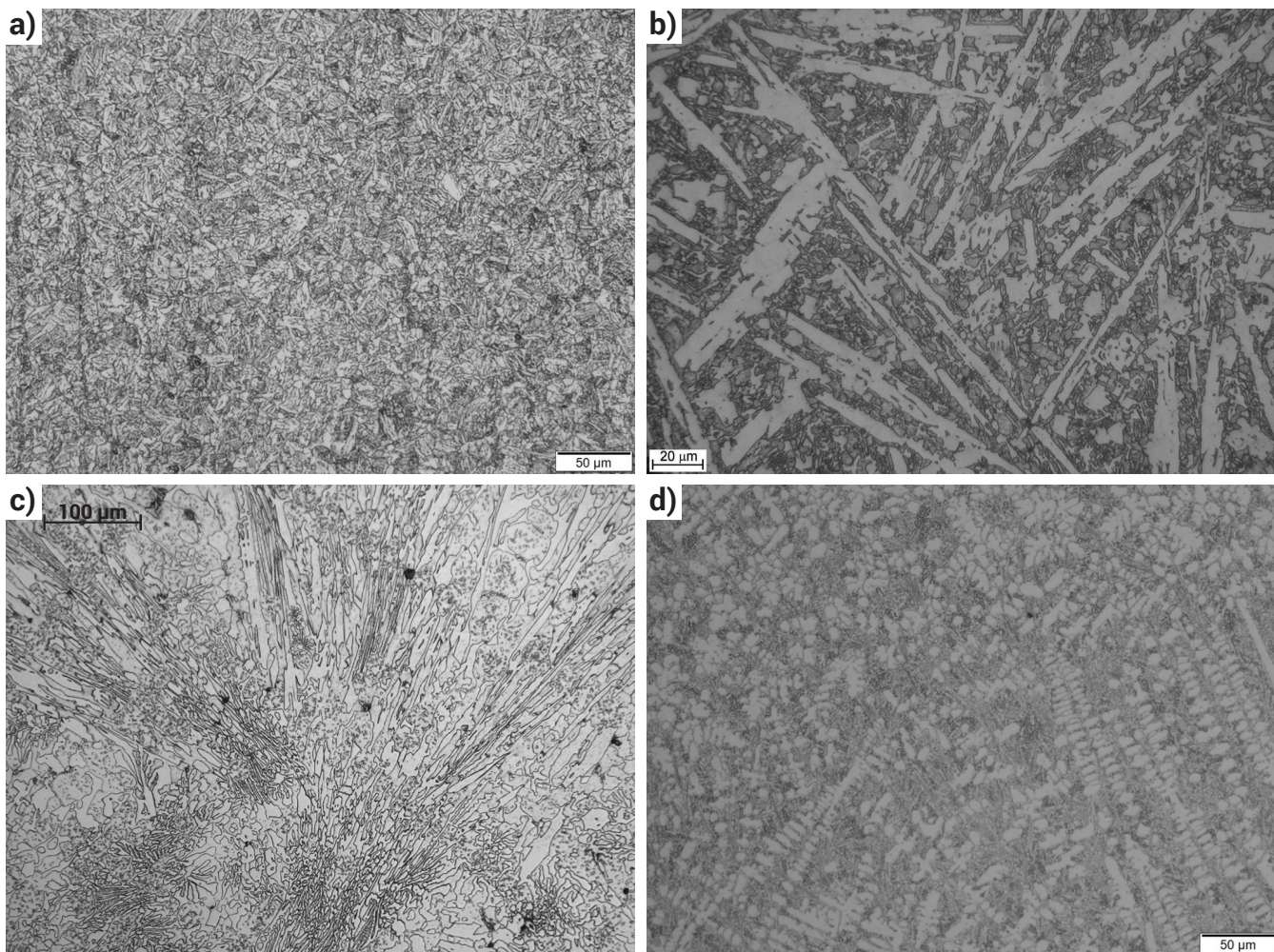
Badania metalograficzne

Badanie metalograficzne mikroskopowe pozwoliło na określenie struktury warstwy roboczej badanych materiałów trudnościeralnych. Rysunek 5 przedstawia mikrostruktury materiału odniesienia (stali Hardox 400) oraz trzech warstw roboczych płyt trudnościeralnych o najlepszej względnej odporności na ścieranie.

Tablica IV. Wyniki pomiarów twardości warstwy roboczej materiału trudnościeralnego przeprowadzone sposobem Rockwella
Table IV. Results of Rockwell hardness measurement of a wear resistant layer

Oznaczenie i numer próbki		Twardość warstwy trudnościeralnej, [HRC]						
		Nr punktu pomiarowego					Wartość średnia	
		1	2	3	4	5		
Alphachrom 7000	p01	63,9	64,4	63,3	64,2	65,1	64,2	63,9
	p02	65,4	63,2	64,8	62,3	62,8	63,7	
HCNb	p01	62,9	62,1	61,1	63,5	62,0	62,3	62,7
	p02	62,3	61,0	67,4	62,3	62,7	63,1	
HCCr	p01	60,7	60,1	60,2	60,3	60,7	60,4	60,3
	p02	60,8	59,8	60,7	59,9	59,7	60,2	
W 150 FD	p01	61,5	61,8	62,4	61,8	63,3	62,2	62,8
	p02	62,8	64,2	64,5	63,0	62,5	63,4	
CDP 4624	p01	60,3	59,0	58,4	60,9	61,0	59,9	59,4
	p02	58,9	60,2	57,9	59,0	58,2	58,8	
CDP 4666	p01	62,8	63,9	60,9	61,2	60,3	61,8	62,1
	p02	62,8	61,6	61,1	62,1	64,5	62,4	
Abradur 64 ¹⁾	p01	63,8	61,4	60,3	62,2	59,8	61,5	61,6
	p02	61,4	61,2	61,8	62,3	61,8	61,7	
EnDOtec® DO*390N ¹⁾	p01	68,9	71,4	72,4	70,0	70,9	70,7	71,2
	p02	70,8	71,2	71,8	72,1	72,5	71,7	
AbrecoPlate	p01	60,2	57,8	61,0	60,7	62,3	60,2	60,1
	p02	58,5	61,7	62,1	57,2	60,6	60,0	
Hardox 400	p01	39,9	42,6	43,1	42,1	42,4	42,0	42,0
	p02	42,1	40,9	41,9	42,0	42,8	41,9	

Uwaga: ¹⁾ Twardość trzeciej warstwy napoiiny



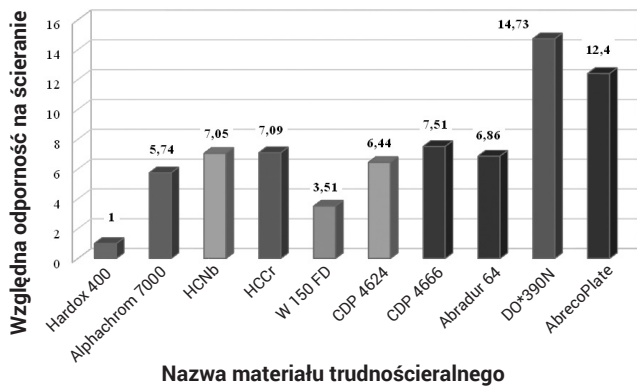
Rys. 5. Mikrostruktury: a) materiału odniesienia – stali Hardox 400; b) trudnościeralnej warstwy roboczej napawanej łukowo metodą FCAW-G drutem EnD0tec® DO*390N; c) warstwy roboczej materiału trudnościeralnego AbrecoPlate; d) warstwy roboczej płyty trudnościeralnej CDP 4666 wykonanej w technologii napawania łukowego metodą FCAW-S

Fig. 5. Microstructures: a) reference material – Hardox 400 steel; b) wear resistant layer FCAW-G welded with EnD0tec® DO*390N cored wire; c) wear resistant material AbrecoPlate; d) CDP 4666 wear resistant plate FCAW-S welded

Podsumowanie

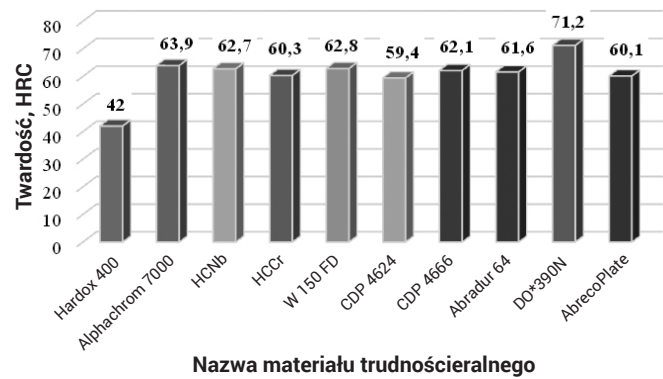
Najwyższą względną odpornością na zużycie ściernie typu metal-minerał charakteryzowała się napoina trójwarstwowa wykonana metodą FCAW-G na płycie bazowej ze stali niestopowej konstrukcyjnej, drutem proszkowym EnD0tec® DO*390N dającym stopiwo bezżuźlowe o wyjątkowej nano-strukturze, zawierającej jednolicie rozmieszczone w osnowie żelaza a węgliki boru, rys. 5b), która była prawie 15-krotnie bardziej odporna na zużycie ściernie niż stal Hardox 400 (rys. 6). Równie wysoką odpornością na ten typ zużycia w odniesieniu do stali Hardox 400 odznaczało się tworzywo warstwowe, złożone z chromowo-molibdenowego żeliwa białego silnie spojonego metalurgicznie z płytą podkładową ze stali niestopowej o nazwie handlowej AbrecoPlate. Względna odporność na ścieranie warstwy roboczej tego materiału nieco ponad 12-krotnie przewyższała odporność na ścieranie stali Hardox 400 (rys. 6). Względnie wysoką odpornością na zużycie ściernie wyróżniały się warstwy robocze płyt trudnościeralnych CDP 4666, HCCr i HCNb, które były ok. 7 razy bardziej odporne na ścieranie od stali Hardox 400. Najniższą odpornością na zużycie ściernie określane zgodnie z normą ASTM G 65-00, odznaczała się warstwa wierzchnia płyty trudnościeralnej W150 FD, która tylko ok. 3,5-krotnie przewyższała odpornością na zużycie materiału odniesienia.

Obok wysokiej odporności na ścieranie napoina dwuwarstwowa wykonana metodą FCAW-G drutem proszkowym EnD0tec® DO*390N wykazywała także najwyższą twardość wynoszącą ok. 71 HRC (rys. 7). Jednak nie zawsze wysoka twardość warstwy roboczej materiału trudnościeralnego przekładała się na wysoką odporność na zużycie ściernie typu metal-minerał. Pomimo wysokiej średniej twardości warstw roboczych płyt trudnościeralnych o nazwach handlowych Alphachrom 7000 (63,9 HRC) i W 150 FD (62,8 HRC) odznaczały się one względem stali Hardox 400 najniższą odpornością na zużycie ściernie. Podobnie jak w przypadku materiału trudnościeralnego AbrecoPlate, gdzie w porównaniu z innymi przebadanymi materiałami dość niska twardość warstwy roboczej (60,1 HRC) nie wpłynęła na obniżenie jego odporności na zużycie ściernie (rys. 6). Należy więc sądzić, że twardość materiału trudnościeralnego nie jest jedynym czynnikiem wpływającym na jego zużycie.



Rys. 6. Odporność na zużycie ściernego typu metal-minerał, określana zgodnie z normą ASTM G 65-00 w odniesieniu do odporności stali Hardox 400, różnych materiałów trudnościeralnych

Fig. 6. Metal mineral wear resistance according to ASTM G65-00 standards of different materials in comparison with Hardox 400 steel



Rys. 7. Średnia twardość, określana zgodnie z normą PN-EN ISO 6508-1:2016, powierzchni warstw roboczych materiałów trudnościeralnych

Fig. 7. Average hardness of different wear resistance materials according to PN-EN ISO 6508-1:2016 standard

Literatura

- [1] Kato K.: Abrasive wear of metals, Tribology International, 1997, nr 5, pp. 333-338.
- [2] Stachowiak G.W.: Particle angularity and its relationship to abrasive and erosive wear, Wear, 2000, nr 241, pp. 214-219.
- [3] Zum Gahr K.H.: Wear by hard particles. Tribology International, 1998, nr 10, pp. 587-596.
- [4] Gawrysiuk W.: Płyty trudnościeralne. Technologie wytwarzania i walory eksploatacyjne, Materiały seminaryjne Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach.
- [5] Stachowiak G.B., Stachowiak G.W.: The effects of particle characteristics on three-body abrasive wear, Wear, 2001, nr 249, pp. 201-207.
- [6] Ma X., Liu R., Li D.Y.: Abrasive wear behavior of D2 tool steel with respect to load and sliding speed under dry sand/rubber wheel abrasion condition, Wear, 2000, nr 1, pp. 79-85.
- [7] Adamiec P., Gawrysiuk W.: Właściwości warstw napawanych o strukturze żeliw chromowych, Biuletyn Spawalnictwa, Gliwice 2004, nr 2.
- [8] Klimpel A., Kik T.: Erosion and abrasion wear resistance of GMA wire surfaced nanostructural deposits, Journal of Archives of Materials Science and Engineering 30(2), April 2008, pp. 121-124.
- [9] Adamiak M., Górka J., Kik T.: Comparison of abrasion resistance of selected constructional materials, Journal of Archives of Materials Science and Engineering 37(2), December 2009, pp. 375-380.
- [10] Materiały reklamowe firmy Contex.
- [11] Materiały reklamowe firmy CeraMetal.
- [12] Materiały reklamowe firmy Kalenborn.
- [13] Materiały reklamowe firmy Castolin.
- [14] Materiały reklamowe firmy SIJ Elektrode.
- [15] Materiały reklamowe firmy Canadian Wear Technologies Ltd.
- [16] Materiały reklamowe firmy SSAB Special Steels.
- [17] ASTM G65-00: Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus.
- [18] Metale – Pomiar twardości sposobem Rockwella – Część 1: Metoda badania.