

RESEARCH OF THE TRIBOLOGY, STRENGTH AND STRUCTURE OF MATERIALS USED FOR THE AGRICULTURAL MACHINES ELEMENTS WORKING IN SOIL

Summary

The chosen samples from steel (38GSA and NJA-034B) and modern cast iron ADI, WITH different phase structure (this is result of different heat treatment,) were tested to determine their tribology, strength and structure properties. As the result of testing and analysis the cast iron ADI was chosen (1 option of heat treatment sign 6-28), in aspect of using it for the agricultural machines elements working in soil.

BADANIA TRIBOLOGICZNE, WYTRZYMAŁOŚCIOWE I STRUKTURALNE WYBRANYCH MATERIAŁÓW STOSOWANYCH NA ELEMENTY MASZYN ROLNICZYCH PRACUJĄCE W GLEBIE

Streszczenie

Zbadano właściwości tribologiczne, wytrzymałościowe i strukturalne wybranych próbek ze stali (38GSA i NJA-034B) oraz z nowoczesnego żeliwa ADI o zróżnicowanej strukturze fazowej, wynikającej z zastosowania różnych wariantów obróbki cieplnej. W wyniku przeprowadzonych badań i analiz wybrano żeliwo sferoidalne ADI (1 wariant obróbki cieplnej oznacz. 6-28), w aspekcie możliwości jego zastosowania na elementy maszyn rolniczych pracujące w glebie.

Wprowadzenie

Trwałość eksploatacyjna elementów maszyn rolniczych pracujących w glebie, w tym lemieszy do pługów ciągnikowych jest szczególnie ważna w aspekcie trwałości i niezawodności maszyn. Awaria elementu lub zespołu prowadzi zwykle do dłuższych przerw w uprawie, powodując duże straty ekonomiczne. Dlatego istotny i jednocześnie trudny jest optymalny dobór materiału konstrukcyjnego. Elementy i zespoły maszyn rolniczych są w czasie eksploatacji w okresach agrotechnicznych poddawane bardzo dużym obciążeniom mechanicznym i tribologicznym. Szczególnie elementy pracujące w glebie narażone są na intensywne ścieranie twardymi cząstkami gleby oraz na oddziaływanie fizyko – chemiczno-mechaniczne.

W ostatnim okresie do grupy tradycyjnych materiałów stalowych, stosowanych na elementy maszyn rolniczych pracujące w glebie, a które wykonywane są tradycyjnymi metodami walcowania, kucia i spawania, dołączyły materiały odlewnicze. Szczególnie dotyczy to nowego na rynku polskim, a szeroko stosowanego w USA, nowoczesnego żeliwa sferoidalnego, hartowanego izotermicznie (ADI) [2]. Technologia odlewania pozwala nie tylko na dowolne kształtowanie elementów, ale jednocześnie na uniknięcie wysokich kosztów nowego oprzyrządowania technologicznego, niezbędnego przy zmianie konstrukcji elementu. Dobór nowych gatunków materiałów na elementy konstrukcyjne maszyn rolniczych poprzedzony być musi wszechstronnymi badaniami laboratoryjno-eksploatacyjnymi, pozwalającymi na stwierdzenie przydatności i celowości ich stosowania.

Spośród wielu elementów roboczych pracujących w glebie, lemiesze płużne charakteryzują się największym jednostkowym i całkowitym zużyciu masowym. Ograniczenie tego znacznego zużycia wiąże się z koniecznością nie tylko opracowania zoptymalizowanego pod

względem geometrii kształtu elementu, ale także doboru optymalnego materiału i technologii wykonania, uwzględniającej możliwości stosunkowo łatwej korekcji zmian.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki porównawczych badań laboratoryjnych (tribologicznych, wytrzymałościowych i strukturalnych), wybranych stali stosowanych dotychczas na lemiesze pługów ciągnikowych oraz kilku eksperymentalnych rodzajów żeliwa ADI, o różnej strukturze fazowej.

Celem tych badań było:

- określenie i porównanie intensywności zużycia oraz momentu i współczynnika tarcia próbek z żeliwa ADI w różnych wariantach obróbki cieplnej (różne struktury fazowe) przy tarciu o wybrane porównawczo stale i żeliwo ADI (przeciwpróbki),
- określenie i porównanie odporności na ścieranie (intensywność zużycia) wybranych gatunków stali i żeliwa ADI przy tarciu w masie ściernej,
- porównanie właściwości wytrzymałościowych badanych materiałów w aspekcie zastosowanej obróbki cieplnej i otrzymanych w jej wyniku struktur fazowych,
- zoptymalizowanie wyboru rodzaju żeliwa ADI w aspekcie jego zastosowania na elementy maszyn rolniczych pracujące w glebie.

Charakterystyki wybranych do badań materiałów Żeliwo ADI

Żeliwo ADI jest to opracowane w USA niskostopowe żeliwo sferoidalne, hartowane z przemianą izotermiczną, znane pod nazwą „Austempered Ductile Iron” (ADI).

Żeliwo to o osnowie metalowej składającej się z igieł ferrytu bainitycznego i nasyconego węglem stabilnego austenitu. Zawartość węgla w austenicie sięga do 2,3%, co powoduje jego dużą trwałość. Skład chemiczny rodzajów żeliwa użytych do badań pokazano w tab. 1.

Tab. 1. Skład chemiczny żeliwa ADI próbek użytych do badań tribologicznych
 Table 1. Chemical constitution of ADI cast iron samples used in tribological testing

Lp.	Oznaczenie próbki	Skład chemiczny [%]								
		C	Si	Mn	P	S	Mg	Ni	Cu	Mo
1.	5	3,60	2,35	0,30	0,05	0,020	0,060	1,50	-	0,30
2.	6-28	3,63	2,86	0,11	0,083	0,029	0,094	1,33	0,56	
3.	6-33									
4.	6-37									

Tab. 2. Skład chemiczny stali użytych do badań laboratoryjnych
 Table 2. Chemical constitution of steels used in laboratory testing

Lp.	Gatunek stali	Skład chemiczny [%]								
		C	Si	Mn	P	S	Ti	B	Cr	Al
1.	38GSA	0,3-0,38	0,8-1,1	0,7-1,1	0,035	0,04	0,06-0,12	-	-	0,02-0,06
2.	NJA-034B (stal borowa)	0,3	0,3	1,2	0,03	0,04	-	0,002-0,004	0,2	-

Żeliwo ADI cechuje się połączeniem wysokiej wytrzymałości na rozciąganie i odporności na ścieranie z bardzo dobrą plastycznością. Plastyczność żeliwa ADI spowodowana jest brakiem fazy węglkowej w strukturze, której powstaniu zapobiega duża zawartość krzemu. Własności mechaniczne zależą od kombinacji i zawartości procentowej składników stopowych, jak również od temperatury przemiany izotermicznej. Niska temperatura przemiany izotermicznej, położona nieznacznie wyżej od temperatury przemiany martenzytycznej, powoduje powstanie struktury dającej najwyższą możliwą twardość i wytrzymałość na rozciąganie, ale również niższą plastyczność. Zastosowanie wyższej temperatury przemiany izotermicznej obniża wytrzymałość i twardość, zwiększając plastyczność i odporność na uderzenie.

Stal z dodatkiem boru – NJA - 034B

Skład chemiczny stali NJA - 034B pokazano w tab. 2. Stale z dodatkiem boru zostały opracowane w Szwecji pod koniec lat siedemdziesiątych [4]. Obecnie są powszechnie stosowane przez państwa skandynawskie i Niemcy na elementy robocze maszyn rolniczych pracujące w glebie. Również w Polsce, w ostatnich latach, wielu producentów lemieszki zaczęło stosować importowaną ze Szwecji stal z dodatkiem boru na produkowane przez siebie lemieszki.

Głównym mikrodotadkiem stopowym stali borowej jest bor w ilości 0,002-0,004%. W tym zakresie bor rozpuszcza się w austenicie powodując przesunięcie krzywych CTP w taki sposób, że już przy zwykłym hartowaniu można otrzymać strukturę bainitu, o znacznie rozdrobionych ziarnach. Strukturę tę w tradycyjnych stalach konstrukcyjnych można otrzymać tylko po hartowaniu izotermicznym. Bainit w stosunku do martenzytu posiada wyższe właściwości mechaniczne (R_m , R_E), wyższą o 20-30% odporność na ścieranie w glebie i przy tarcu o stal, znacznie lepsze właściwości plastyczne.

Udarność bainitu, o twardości 40-48 HRC jest zwykle 2-3 krotnie wyższa w stosunku do martenzytu odpuszczonego o tej samej twardości.

Z drugiej strony przekroczenie zawartości boru powyżej 0,004% może jednak spowodować negatywne skutki tworząc z węglem węgliki boru (borki). Powstałe w ten sposób borki lokują się bowiem na krawędzi ziaren stali powodując powstanie tzw. karbu strukturalnego i znaczny spadek udarności oraz plastyczności. Po hartowaniu nie tworzy się wtedy struktura bainitu tylko martenzyt.

Warto także zwrócić uwagę, że stale z dodatkiem boru o strukturze bainitu nie podlegają odpuszczaniu. Stosuje się tylko ewentualnie odprężanie w temperaturach 180-200°C.

Stal 38GSA

Skład chemiczny stali 38GSA pokazano w tab. 2. Stal ta została opracowana specjalnie na elementy maszyn rolniczych pracujące w glebie. Zawiera mikrodotadki aluminium i tytanu rozdrabniające ziarna, co według badań prowadzonych w PIMR-Poznań [1], powoduje podniesienie odporności na ścieranie w stosunku do stali 40GS, powszechnie stosowanej w przemyśle maszyn rolniczych o 11-35% i znaczące podniesienie udarności.

Przygotowanie próbek

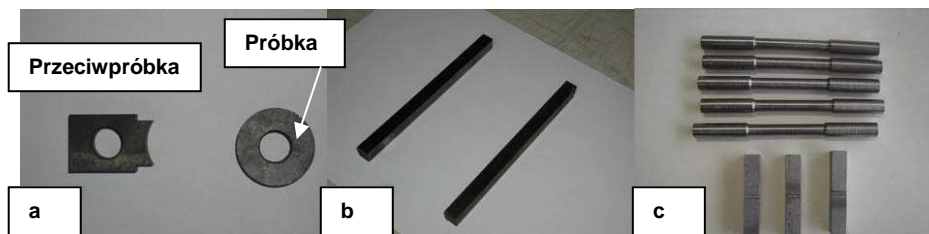
Do badań tribologicznych (w warunkach tarcia suchego metal-metal) przeznaczono:

- próbki z żeliwa ADI, poddane następującej obróbce cieplnej:
 - oznaczone 6-28, austenityzacja, (900°C), hartowanie z przemianą izotermiczną w temperaturze 280°C/2h, do twardości ~ 41 HRC,
 - oznaczone 6-33, austenityzacja, (900°C), hartowanie z przemianą izotermiczną w temperaturze 330°C/2h, do twardości ~ 33 HRC,
 - oznaczone 6-37, austenityzacja, (900°C), hartowanie z przemianą izotermiczną w temperaturze 370°C/2h, do twardości ~ 30 HRC,
- przeciwpróbki ze stali 38GSA, NJA-034B, wykonane i obrobione cieplnie do twardości 41 - 43HRC oraz z żeliwa ADI „5” austenityzowanego (900°C) i hartowanego z przemianą izotermiczną w temperaturze 330°C/2h, do twardości ~38 HRC.

Do badań tribologicznych (w masie ściernej) przeznaczono:

- próbki z żeliwa ADI oznaczone 6-28 (jw.), 6-33 (jw.) oraz porównawczo ze stali 38GSA, 40GS, 45, NJA-034B ulepszonej cieplnie do twardości 41-43 HRC.

Na rys. 1 przedstawiono kształt próbek do badań: (a) tribologicznych (tarcie metal-metal), (b) tribologicznych (w masie ściernej), (c) wytrzymałościowych i strukturalnych.



Rys. 1. Widok próbki (krążek) i przeciwp próbki do badania odporności na ścieranie (metal-metal) na maszynie Amslera: (a) Widok próbek kwadratowych do badań odporności na ścieranie w masie ścierniej; (b) Widok próbek do badań wytrzymałościowych i strukturalnych (c)

Fig. 1. View of the sample (disc) and antisample for abrasion resistance testing (metal-metal) on Amsler machine (a).

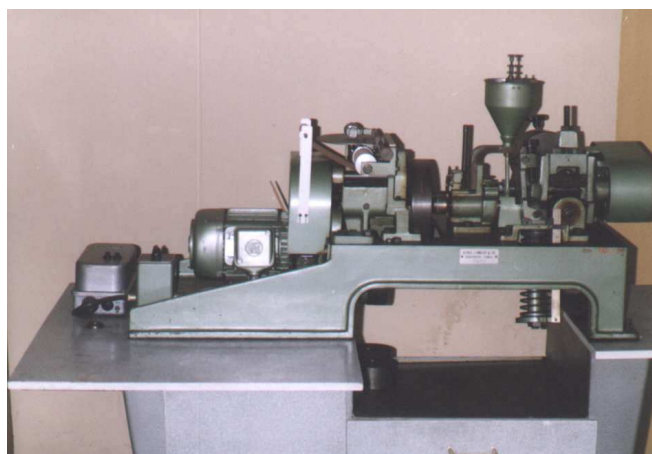
View of square samples for abrasion resistance testing in abrasion mass (b).

View of samples for strength and structural testing (c)

Metodyka badań

Badania tribologiczne (w warunkach tarcia suchego metal-metal)

Badania przeprowadzono na maszynie do badania ścieralności metali typu Amsler-A135, produkcji szwajcarskiej. Maszyna umożliwia prowadzenie badań ścieralności przy ruchu obrotowym, w zakresie obciążeń badanych próbek 0-200 daN, przy dwóch prędkościach obrotowych wałka, na którym mocowana jest próbka, wynoszących 200 i 400 obr/min, w warunkach tarcia suchego lub przy zastosowaniu smarowania. Maszyna wyposażona jest w urządzenie mierzące i rejestrujące przebieg momentu tarcia. Widok maszyny pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Widok maszyny Amslera do badania odporności na ścieranie, przy tarcu metal o metal

Fig. 2. View of Amsler's machine for abrasion resistance testing by metal-metal friction

Badania prowadzono zgodnie z normą PN-82/H- 04332 pt. „Badanie zużycia metali lub ich warstw dyfuzyjnych w procesie tarcia ślizgowego przy stałym nacisku na maszynie Amslera”. Zastosowano metodę „A”, badania w układzie klocek-krążek, gdzie przeciwp próbka z badanego materiału (klocek) pozostaje nieruchoma, a próbka (krążek) obraca się, przy tarcu suchym (bez smarowania). Zgodnie z zaleceniami normy dla wszystkich par przeprowadzono wstępne docieranie (nieuwzględniane w wynikach) do momentu uzyskania 70% powierzchni styku pomiędzy próbka i przeciwp próbka. Zużycie określano metodą wagową, dokonując co określony czas (100 minut) pomiarów masy próbek za

pomocą elektronicznej wagi analitycznej SARTORIUS, typ CP224S-OCE o zakresie udźwigu 0,0001 – 200 g, z dokładnością do $\pm 0,0002$ g. Każdą parę badano trzykrotnie, na ustalonej drodze tarcia (2512 m) i następnie obliczano średnie wyniki. Na podstawie zużycia wagowego próbki obliczono jego intensywność według poniższego wzoru:

$$I_{pw} = \frac{Z_{pw}}{s} \text{ [g/m]} \quad (1)$$

gdzie:

I_{pw} - intensywność zużycia wagowego [g/m]

Z_{pw} - zużycie wagowe próbki w okresie ustalonego przebiegu zużycia [g]

s - całkowita droga tarcia - 2512 m.

Współczynnik tarcia μ_{sr} obliczono ze wzoru:

$$\mu_{sr} = \frac{M_t}{N \cdot r} \quad (2)$$

gdzie:

r - promień przeciwp próbki w [cm] = 2 cm

M_t - moment tarcia [daNcm]

N - nacisk [daN].

Moment tarcia odczytywano bezpośrednio z wydruku na maszynie.

Dla przeprowadzenia niniejszych badań przyjęto następujące parametry:

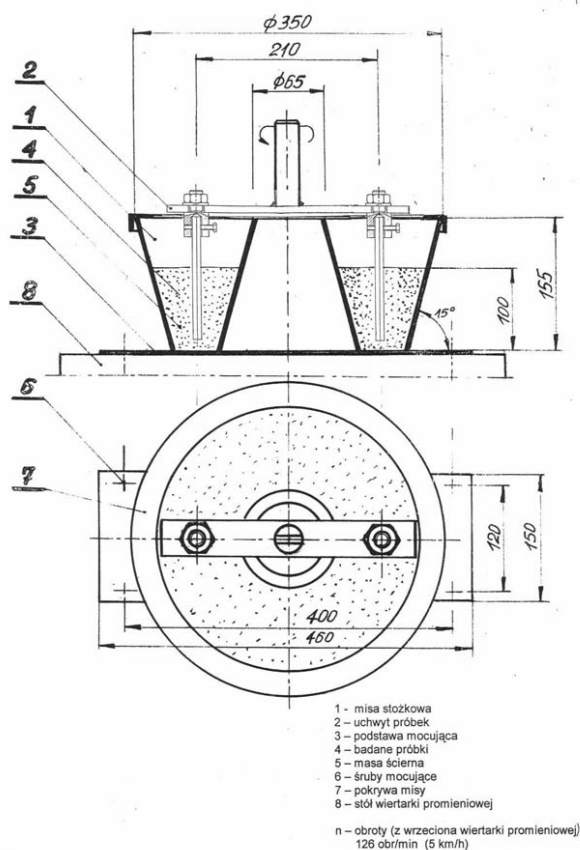
- obciążenie (N) próbek = 60 daN, odpowiadające stosowanemu przy badaniu odporności na ścieranie stali w innych badaniach prowadzonych na maszynie Amslera w PIMR,
- obroty próbki (krążka) 200 obr/min, (0,42 m/s).

Podczas badań sprawdzano temperaturę próbek, za pomocą termometru stykowego marki „Testo”, produkcji niemieckiej, o zakresie pomiaru -50 do $+250^\circ\text{C}$ i dokładności pomiaru $\pm 2^\circ\text{C}$. Dodatkowym założeniem było nie przekroczenie przez badane próbki temperatury końcowej 150°C , gwarantującej brak zmian strukturalnych oraz możliwości zatarcia się powierzchni próbek.

Badania tribologiczne (w warunkach tarcia w misie ścierniej)

Badania przeprowadzono na specjalnie skonstruowanym stanowisku, którego schemat pokazano na rys. 3.

Stanowisko jest zmodernizowaną i znacznie zmniejszoną gabarytowo wersją stanowiska opracowanego w latach siedemdziesiątych [2, 3] i przez wiele lat stosowanego w PIMR do badań ścieralności.



Rys. 3. Uniwersalne stanowisko do badań odporności na ścieranie próbek i elementów roboczych maszyn rolniczych w masie ścierniej

Fig. 3. General-purpose stand for abrasion resistance testing of samples and working elements of agricultural machines in abrasion mass

Stanowisko (rys. 3) składa się ze stożkowej misy [1] przyspawanej do prostokątnej podstawy mocującej [3]. Badane próbki (rys.4) umieszczone są w listwowym uchwycie (rys. 5), obejmującym dwie próbki [2]. Uchwyt ma przyspawany trzpień, do zamocowania w uchwycie wrzeciono wiertarki promieniowej. Misa mocowana jest do stołu wiertarki promieniowej za pomocą 4 śrub [6]. Misa przykryta

jest blaszaną pokrywą z wycięciem [7] umożliwiającym obrotowy ruch badanych próbek, częściowo zabezpieczającym przed wysypywaniem się masy ścierniej podczas obrotu.

Masa ścierna [5] zasypywana jest do wysokości 100 mm. Obroty badanym próbkom lub zębom nadawane są przez wrzeciono wiertarki. W badaniach ustalono liczbę obrotów na $n = 126$ obr/min, co przy promieniu na jakim pracują badane zęby, daje liniową prędkość poruszania się zębów w masie ścierniej $v = 5$ km/h, odpowiadającą prędkości poruszania się pługów i bron podczas pracy na polu. W obecnych badaniach jako masy ścierniej użyto:

- a) mieszanki glebowej o składzie: 40% obj. piasku kwarcowego (wielkość ziarna 0,5-1,5mm), 60% ścierniwa elektro-korundowego, szlachetnego 99A, o wielkości ziarna P12-50% obj., P36-50% obj., według PN - 76/M - 59107, uprzednio wysuszonego w suszarce.

Charakterystykę ścierniwa i skład granulometryczny podano w tab. 3 i 4.

Przed właściwymi badaniami stosowano okres docierania, nieuwzględniany w wynikach. Zaproponowany skład mieszanki masy ścierniej w badaniach w misie jest zbliżony do podstawowego składu gleby.

Zużycie określano metodą wagową, dokonując co 20 h (po 100 km przebiegu), pomiarów masy próbek, za pomocą elektronicznej wagi analitycznej, typ „Sartorius”, produkcji firmy „Satropol” z Poznania, o zakresie udźwigu 0,0001-200 g, z dokładnością do $\pm 0,0002$ g. Każdą parę badano dwukrotnie, na ustalonej drodze tarcia (100 km) i następnie obliczano średnie wyników.

Intensywność zużycia określano zgodnie z wzorem podanym w normie dla badań wykonywanych za pomocą maszyny Amslera, (PN-82/H- 04332):

$$I_{pw} = \frac{Z_{pw}}{s} \text{ [g/km]} \quad (1)$$

gdzie:

I_{pw} - intensywność zużycia wagowego [g/km]

Z_{pw} - zużycie wagowe próbki w okresie ustalonego przebiegu zużycia [g]

s - całkowita droga tarcia [100 km].

Tab. 3. Charakterystyka ścierniwa elektro-korundowego PN - 76/M - 59111

Table 3. Characteristic of aloxite abrasant PN - 76/M - 59111

Gatunek elektrokorundu		Wielkość ziarna wg PN-76/M-59107	Wielkość ziarna [μm]	Gęstość [g/cm ³] (Mg/m ³)
Nazwa	Symbol			
Elektrokorund szlachetny: Al ₂ O ₃ - min 99%, SiO ₂ - 0,3%, Fe ₂ O ₃ - 0,3%, CaO - 0,2%	99A	Ziarno nr: P12, P36	2000 600	3,90

Tab. 4. Skład granulometryczny ścierniwa kwarcowego

Table 4. Granule-metric constitution of quartz abrasant

Lp	Skład granulometryczny				
	<0,5mm	0,5-0,75 mm	0,75-1,0mm	1,0-1,5mm	<1,5
Piasek kwarcowy (SiO ₂)	Procentowy udział frakcji				
	59	24	11	2,6	3,4

Badania wytrzymałościowe próbek z żeliwa ADI

Badania statycznej próby rozciągania w temperaturze pokojowej zgodnie z normą PN-EN 100021AC1 wykonano przy użyciu maszyny wytrzymałościowej ZDM produkcji niemieckiej. Określono wytrzymałość maksymalną przy rozciąganiu: R_m .

Badania udarności i twardości próbek z żeliwa ADI

Badania przeprowadzono na próbkach typu Mesnager zgodnie z normą PN/H – 04370, przy użyciu standardowego młota Charpy'ego. Twardość próbek zbadano na twardościomierzu marki „Zwick”, typ ZHR4150AK, stosując pomiar metodą Rockwella, w skali „C”, zgodnie z PN-EN ISO-6508.

Badania metalograficzne (MO) i skaningowe (SEM)

Do badań metalograficznych użyto mikroskopu metalograficznego typu NEOPHOT 33, produkcji niemieckiej. Obserwacji poddano odpowiednio przygotowane, wypolerowane i wytrawione zglądy przy powiększeniach 500 i 700x. Trawiono odczynnikami Mi1 Fe (nital). Obserwacje skaningowe przełomów wybranych materiałów wykonano na mikroskopie SEM, o zmiennej próżni, VEGA 5135 prod. TESCAN – USA, przy powiększeniu 1000x.

Przeprowadzono obserwacje struktur następujących próbek:

- próbka ze stali 38GSA
- próbka ze stali NJA-034B
- próbka z żeliwa ADI (6-28)
- próbka z żeliwa ADI (6-33)
- próbka z żeliwa ADI (6-37).

Wyniki badań i ich omówienie

Badania tribologiczne (w warunkach tarcia suchego metal-metal)

Wyniki badań ścieralności przy tarceniu o wybrane materiały metalowe prowadzone na maszynie Amslera, zestawiono w tab. 5 oraz pokazano graficznie na rys. 4-6.

Jak wynika z tab. 5 oraz rys. 4 i 5, intensywność zużycia próbki z żeliwa ADI oznaczonej 6-28, w porównaniu z wybraną stalą borową i stalą 38GSA, jest najniższa z trzech rozpatrywanych wariantów obróbki cieplnej żeliwa ADI (6-28, 6-33 i 6-37) i niższa od intensywności zużycia obu stali. Przy tarceniu próbek z żeliwa ADI (6-28, 6-33, 6-34) na żeliwie ADI „5” (rys. 6) najniższą intensywnością zużycia cechuje się próbka z żeliwa ADI oznaczona 6-33. Pozostałe próbki (6-28 i 6-37) posiadają intensywność zużycia nieco wyższą od próbki 6-33.

Wyniki powyższe wskazują, że najlepszym wariantem ze względu na skład chemiczny i warunki obróbki cieplnej, w aspekcie odporności na ścieranie przy tarceniu metal o metal, jest wariant żeliwa ADI oznaczony jako 6-28.

Tab. 5. Zestawienie wyników badań odporności na ścieranie, prowadzonych na maszynie Amslera przy tarceniu o wybrane materiały

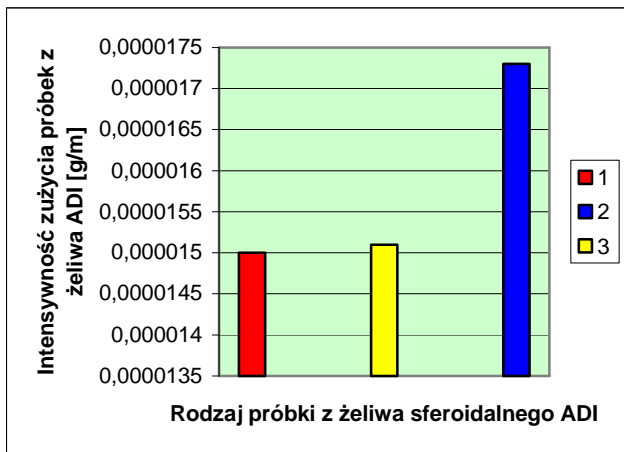
Table 5. Results of abrasion resistance testings carried out on Amsler's machine by friction against chosen materials

Lp.	Materiał		Obciążenie N [daN]	Średni moment tarcia M_t [daNcm]	Średni wsp. tarcia μ_{sr}	Średni ubytek masy próbki [g]	Średnia temp. próbki [°C]	Średnia intensywność zużycia próbki I_{pw} [g/m]
	Próbka	Przeciw próbka						
1.	ADI (6-28)	Stal NJA-034B	60	40	0,33	0,0377	124	0,0000150
2.	ADI (6-33)		60	39,3	0,33	0,0379	121	0,0000151
3.	ADI (6-37)		60	39,5	0,33	0,0435	119	0,0000173
4.	ADI (6-28)	Stal 38GSA	60	39,5	0,33	0,0502	119	0,0000252
5.	ADI (6-33)		60	39	0,32	0,0471	120	0,0000498
6.	ADI (6-37)		60	41,5	0,35	0,138	125	0,0000550
7.	ADI (6-28)	Żeliwo ADI „5”	60	38	0,32	0,0502	114	0,0000200
8.	ADI (6-33)		60	38	0,32	0,0396	117	0,0000157
9.	ADI (6-37)		60	39	0,32	0,0499	120	0,0000199

Tab. 6. Zestawienie średnich wyników intensywności zużycia badanych materiałów, przy tarceniu o masę ścierną (korund + piasek)

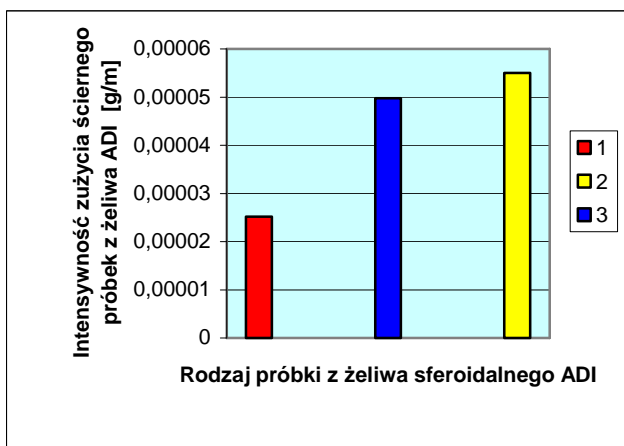
Table 6. Average results of wear intensity of tested materials by friction against abrasive mass (corundum + sand)

Lp.	Oznaczenie	Twardość [HRC]	Droga tarcia [km]	Średni ubytek masy [g]	Średnia intensywność zużycia [g/km]
1.	ADI – 6-28	41	100	0,0073	0,000073
2.	ADI – 6-33	33	100	0,0128	0,000128
3.	Stal 38GSA	43	100	0,0161	0,000161
4.	Stal 45	41	100	0,0180	0,000180
5.	Stal 40GS	43	100	0,0089	0,000089
6.	NJA-034B	41	100	0,0077	0,000077



Rys. 4. Porównanie intensywności zużycia I_{pw} [g/m] próbek z żeliwa ADI przy tarceniu o przeciwpróbkę ze stali NJA-034B (stali borowej), gdzie: 1 - próbka oznaczona 6-28, 2 - próbka oznaczona 6-33, 3 - próbka oznaczona 6-37

Fig. 4. Comparison of wear intensity I_{pw} [g/m] of ADI cast iron samples by friction against NJA-034B steel (boron steel) antisample where: 1 - sample sign 6-28, 2 - sample sign 6-37, 3 - sample sign 6-33



Rys. 5. Porównanie intensywności zużycia I_{pw} [g/m] próbek z żeliwa ADI przy tarcieniu o przeciwpróbkę ze stali 38GSA, gdzie: 1 - próbka oznaczona 6-28, 2 - próbka oznaczona 6-37, 3 - próbka oznaczona 6-33

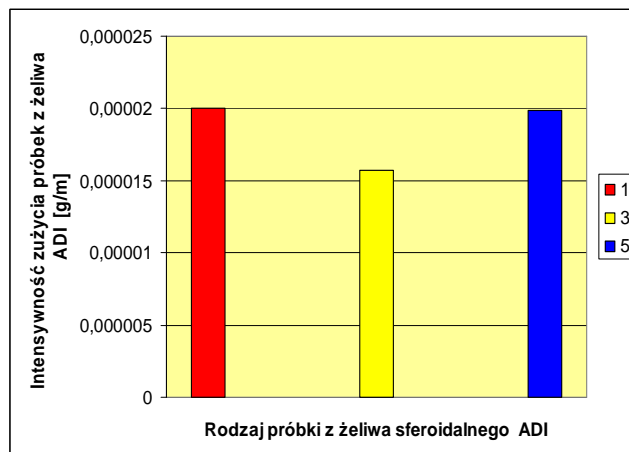
Fig. 5. Comparison of wear intensity I_{pw} [g/m] of ADI cast iron samples by friction against 38GSA steel antisample where: 1 - sample sign 6-28, 2 - sample sign 6-37, 3 - sample sign 6-33

Badania tribologiczne (w warunkach tarcia w misie ściernej)

W tab. 6 zestawiono otrzymane średnie zużycie masowe i intensywność zużycia na drodze 100 km. Dodatkowo przedstawiono graficznie intensywność zużycia na wykresie rys. 7.

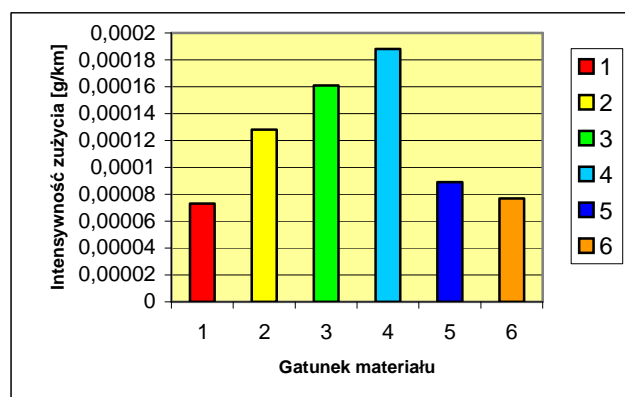
Jak wynika z tab. 6 i rys. 7, intensywność zużycia próbki z żeliwa ADI oznaczonej 6-28 (1), w porównaniu z próbką z żeliwa oznaczonej 6-33 (2), stalą 38GSA (3), stalą 45 (4), jest najniższa z rozpatrywanych wariantów obróbki cieplnej żeliwa ADI (6-28, 6-33 i 6-37) i niższa od intensywności zużycia obu stali. W stosunku do stali 40GS (5) intensywność zużycia żeliwa ADI oznaczonego 6-28 jest nieznacznie niższa i prawie identyczna jak intensywność zużycia stali z dodatkiem boru (6). Z powyższego wynika, że głównym czynnikiem powodującym zmniejszenie intensywności zużycia jest struktura bainitu, odznaczająca się najlepszymi właściwościami mechanicznymi. Strukturę bainitu posiada zarówno żeliwo ADI jak i stal z dodatkiem boru.

Wyniki powyższe wskazują, że najlepszym wariantem ze względu na skład chemiczny i warunki obróbki cieplnej żeliwa ADI, w aspekcie odporności na ścieranie w misie ściernej, w (zadany medium ściernym) jest wariant oznaczony jako 6-28.



Rys. 6. Porównanie intensywności zużycia I_{pw} [g/m] próbek z żeliwa ADI przy tarcieniu o przeciwpróbkę z żeliwa sferoidalnego ADI „5” gdzie: 1 - próbka oznaczona 6-28, 3 - próbka oznaczona 6-33, 5 - próbka oznaczona 6-37

Fig. 6. Comparison of wear intensity I_{pw} [g/m] of ADI cast iron samples by friction against ADI „5” spheroidal iron where: 1 - sample sign 6-28, 3 - sample sign 6-33, 5 - sample sign 6-37



Rys. 7. Porównanie intensywności ścierania badanych materiałów w misie ściernej: gdzie: 1 - ADI 6-28, 2 - ADI 6-33, 3 - 38GSA, 4 - 45, 5 - 40GS, 6 - NJA-034B (stal borowa)

Fig. 7. Comparison of abrasion intensity of tested materials in abrasive pan where: 1 - ADI 6-28, 2 - ADI 6-33, 3 - 38GSA, 4 - 45, 5 - 40GS, 6 - NJA-034B (boron steel)

Badania wytrzymałościowe (wytrzymałość na rozciąganie, twardość, udarność)

Wyniki badań wytrzymałościowych oraz twardości i udarności próbek z żeliwa ADI przedstawiono w tab. 7. W tab. 8, 9 podano porównawczo katalogowe wartości tych parametrów próbek ze stali NJA 034B oraz 38GSA.

Wyniki powyższe wskazują na wysokie parametry mechaniczne próbek z żeliwa ADI.

Badania strukturalne (metalograficzne i SEM)

Na podstawie obserwacji mikroskopowych OM (Optical Microscop) i SEM (Scanning Electron Microscop) próbek z żeliwa ADI oraz badanych porównawczo stali, stwierdzono znaczne zróżnicowanie struktur fazowych.

Na rys. 8-9 przedstawiono struktury metalograficzne próbek oraz opisano występujące fazy.

Tab. 7. Zestawienie wyników badań mechanicznych próbek z żeliwa sferoidalnego ADI
 Table 7. Results of mechanical testing of ADI spheroidal iron samples

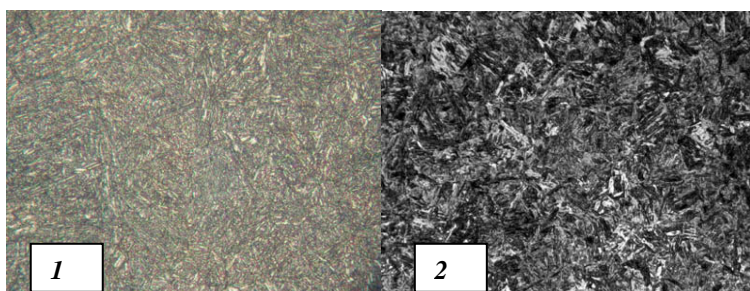
Lp.	Próbka oznaczenie	Średnia twardość [HRC]	Rm _{sr} [MPa]	Średnia udarność [kJ/m ²]
1.	6-28	41	1352	16,5
2.	6-33	33	1080	22,5
3.	6-37	30	885	22,9

Tab. 8. Właściwości wytrzymałościowe stali NJA034B z dodatkiem boru [4]
 Table 8. Strength properties of NJA034B steel (boron steel) [4]

Lp.	Stan stali	Średnia granica plastyczności R _E [MPa]	Średnia wytrzymałość na rozciąganie R _m [MPa]	Średnie wydłużenie A [%]	Średnia twardość [HRC]	Średnia udarność [kJ/m ²]
1.	Walcowana	350-420	520-620	22-25	185 HB	-
2.	Hartowana w oleju	750-1000	1050-1400	8-10	30-40	80-100

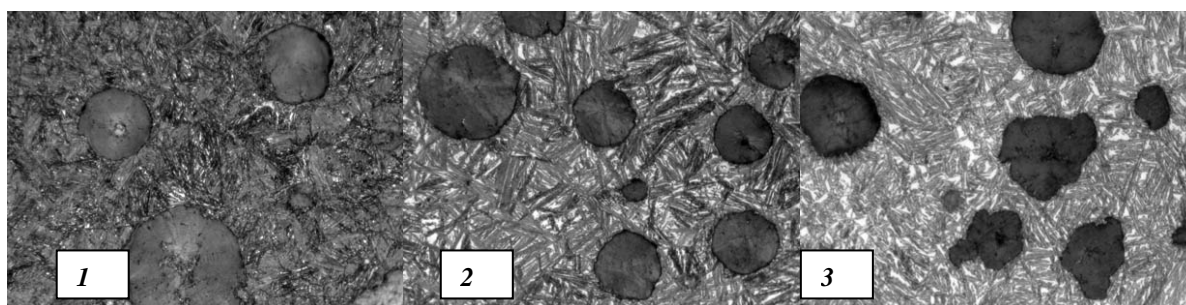
Tab. 9. Właściwości wytrzymałościowe stali 38GSA [4]
 Table 9. Strength properties of 38GSA steel [4]

Lp.	Stan stali	Średnia granica plastyczności R _E [MPa]	Średnia wytrzymałość na rozciąganie R _m [MPa]	Średnie wydłużenie A [%]	Średnia twardość [HRC]	Średnia udarność [kJ/m ²]
1.	Hartowany w wodzie i nisko odpuszczany	1100	1320	10	43	65



Rys. 8. Próbkę ze stali 38GSA. Martenzyt odpuszczony. Powiększenie 700 x (1); Próbkę ze stali z dodatkiem boru (NJA-034B). Bainit. Powiększenie 500x (2)

Fig. 8. 38GSA steel sample. Tempered martensite. Magnification 700x (1); NJA034B steel (boron steel) sample. Bainite. Magnification 500x (2)



Rys. 9. Próbkę z żeliwa ADI nr 6-28. Grafit sferoidalny na tle bainitu i nieznacznej ilości austenitu szczątkowego. Powiększenie 500 x (1);

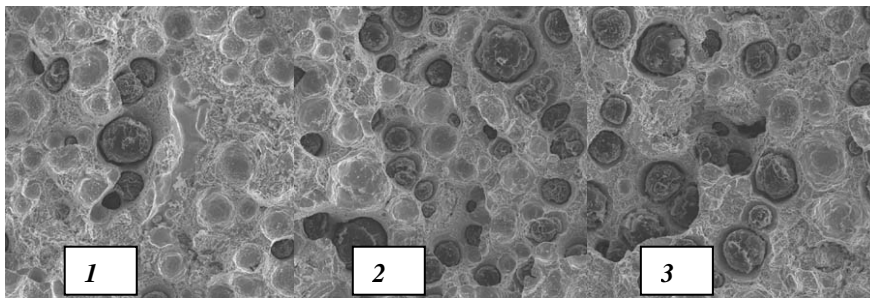
Próbkę z żeliwa ADI nr 6-33. Grafit sferoidalny na tle bainitu, martenzytu i austenitu szczątkowego. Znacznie większe ziarno niż w próbce 6-28. Powiększenie 500 x (2);

Próbkę z żeliwa ADI nr 6-37. Grafit sferoidalny na tle bainitu, martenzytu i austenitu szczątkowego. Nieznaczne wtrącenia wolnego ferrytu. Znacznie większe ziarno niż w próbce 6-28. Powiększenie 500 x (3)

Fig. 9. Sample Nr 6-28 of ADI cast iron. Spheroidal graphite on the background of bainite and residual austenite. Magnification 500x (1);

Sample Nr 6-33 of ADI cast iron. Spheroidal graphite on the background of bainite, martensite and residual austenite. Considerably bigger grain than in 6-28 sample. Magnification 500x (2);

Sample Nr 6-37 of ADI cast iron. Spheroidal graphite on the background of bainite, martensite and residual austenite. Insignificant inclusions of free ferrite. Considerably bigger grain than in 6-28 sample. Magnification 500x (3)



Rys. 10. Próbkę z żeliwa ADI nr 6-28. Sferoidalny grafit i ziarna osnowy. Widoczna podłużna eutektyka w pobliżu grafitu. Powiększenie 1000x (1);

Próbkę z żeliwa ADI nr 6-33. Sferoidalny grafit i ziarna osnowy. Większa ilość grafitu niż w próbce 6-28. Stosunkowo drobne ziarno. Powiększenie 1000x (2);

Próbkę z żeliwa ADI nr 6-37. Sferoidalny grafit i ziarna osnowy. Większa ilość grafitu i większa średnica ziaren osnowy niż w próbce 6-28. Powiększenie 1000x (3)

Fig. 10. Sample Nr 6-28 of ADI cast iron. Spheroidal graphite and grains of groundmass. Visible is longitudinal eutectic near graphite. Magnification 1000x (1);

Sample Nr 6-33 of ADI cast iron. Spheroidal graphite and grains of groundmass. More graphite than in 6-28 sample. Relatively fine-grain. Magnification 1000x (2);

Sample Nr 6-37 of ADI cast iron. Spheroidal graphite and grains of groundmass. More graphite and bigger grains diameter of groundmass than in 6-28 sample. Magnification 1000x (3)

Generalnie struktury próbek ze stali 38 GSA i NJA-034B uznano za prawidłowe. Podobnie ze strukturą drobnego bainitu próbki z żeliwa sferoidalnego hartowanego z przemianą izotermiczną oznaczonej 6-28. Struktury próbek oznaczonych 6-33 i 6-37 zawierają za dużo austenitu szczątkowego oraz gruboiglasty bainit wraz z domieszką martenzytu. Przekształcanie się austenitu szczątkowego w martenzyt, pod wpływem obciążeń powstałych podczas pracy narzędzi np. lemieszy, na skutek większej objętości martenzytu, może spowodować powstanie w lemieszu dużych naprężeń, mogących być przyczyną mikropęknięć. Przypadek pęknięcia lemiesza na postoju, pod wpływem w ten sposób powstałych naprężeń, zaobserwowano podczas wstępnych badań prowadzonych w roku 2003 [5]. Dodatkowo czynnikiem sprzyjającym pękaniu, jest gruboziarnistość struktury, świadcząca o przegrzaniu podczas obróbki cieplnej. Wtrącenia wolnego ferrytu w próbce 6-37 świadczą albo o zbyt niskiej temperaturze wygrzewania do hartowania albo o zbyt krótkim czasie wygrzewania w tej temperaturze.

Na rys. 10 przedstawiono zdjęcia skaningowe (SEM) przełomów żeliwa ADI (6-28, 6-33, 6-37) w różny sposób obrabianego cieplnie (optymalizowane parametry hartowania izotermicznego).

Obserwacje topografii powierzchni próbek, przeprowadzone na mikroskopie skaningowym, potwierdziły wyniki otrzymane podczas badań metalograficznych.

Wnioski

1. Badania intensywności ścierania przy tarcu metal o metal, przeprowadzone przy pomocy trybometru „Amsler”, próbek (krążków) wykonanych z żeliwa ADI, w różnych wariantach obróbki cieplnej, oznaczone jako 6-28 (41 HRC), 6-33 (33 HRC) i 6-37 (30 HRC), wykazały zróżnicowaną intensywność ścierania:
 - a) Przy tarcu o próbkę ze stali 38GSA (41 HRC), najniższą intensywnością ścierania wykazała próbka 6-28, następnie 6-37 i 6-33,
 - b) Przy tarcu o próbkę ze stali NJA-034B (stal z dodatkiem boru, 41 HRC), najniższą intensywność ścierania wykazała próbka 6-28, następnie 6-33 i 6-37,

- c) Przy tarcu o próbkę z żeliwa ADI (41 HRC), najniższą intensywność ścierania wykazała próbka 6-33.

Intensywność zużycia stali NJA-034B jest porównywalna a stali 38GSA wyższa (przy twardości obu stali ~42 HRC) od intensywności zużycia żeliwa ADI, oznaczonego 6-28.

2. Badania intensywności ścierania przy tarcu metal – masa ścierna próbek z żeliwa ADI 6-28 (41HRC) 6-33 (33HRC) oraz próbek ze stali 38GSA, NJA-034B i 45 wykazały, że najniższą intensywność ścierania w zadanych warunkach tribologicznych osiągnęły próbki z żeliwa ADI oznaczone 6-28 oraz ze stali NJA-034B (stal z dodatkiem boru).

3. Badania wytrzymałości na zrywanie, udarności i twardości próbek z żeliwa ADI dowiodły, że najlepsze wartości tych parametrów, w aspekcie aplikacyjnym (na lemiesze), wykazywały próbki z żeliwa ADI (6-28).

Wyniki te kształtują się następująco:

- a) próbka 6-28, $R_m=1352$ MPa, $U=16,5$ kJ/m², HRC=41,
- b) próbka 6-33, $R_m=1080$ MPa, $U=22,5$ kJ/m², HRC=33,
- c) próbka 6-37, $R_m=885$ MPa, $U=22,9$ kJ/m², HRC=30.

Właściwości wytrzymałościowe stali NJA-034B i 38GSA (wytrzymałość na zrywanie, granica plastyczności i twardość) są porównywalne z właściwościami próbek z żeliwa ADI. Udarność żeliwa ADI w stosunku do obu stali jest niższa, nie mniej w świetle wstępnych badań eksploatacyjnych [5] wydaje się być dostateczną w aspekcie aplikacji na lemiesze do pługów.

4. Badania metalograficzne i skaningowe próbek z żeliwa ADI, wykazały, że najbardziej prawidłową strukturę i drobne ziarno posiada próbka oznaczona 6-28. Próbki 6-33 i 6-37 posiadają zbyt dużo austenitu szczątkowego w strukturze i są stosunkowo gruboziarniste.
5. Przeprowadzone badania dowiodły, że najbardziej optymalnym wariantem obróbki cieplnej żeliwa ADI jest wariant oznaczony 6-28, o najwyższej twardości, czyli o najniższej temperaturze soli chłodzącej podczas obróbki cieplnej.
6. Zaleca się zastosowanie wytypowanego wariantu (6-28) obróbki cieplnej do próbnych lemieszy, z żeliwa ADI przeznaczonych do dalszych badań eksploatacyjnych (tribologiczno-trwałościowych).

Literatura

- [1] Łabęcki M. i inni: Uruchomienie produkcji odlewów części zamiennych do maszyn rolniczych z wysokojakościowego, stopowego żeliwa sferoidalnego. Zadanie 1. Badania warunków pracy i zużycia wybranych elementów maszyn rolniczych pracujących w glebie. PIMR – TT – 2/2006.
- [2] Tybulczuk J; Kowalski A. W.: Żeliwo ADI – Własności i zastosowanie w przemyśle. Atlas odlewów. Instytut Odlewnictwa, Kraków 2002 r.
- [3] Pirowski Z. i inni: Wstępne badania przydatności nowych tworzyw odlewniczych na wybrane elementy maszyn rolniczych. Instytut Odlewnictwa, nr 2053, 2003 r.
- [4] Der phantastische Bohrstal. Wyd. Norrbottens Järnverk, Lulea, Szwecja.
- [5] Łabęcki M.: Badania laboratoryjne oraz eksploatacyjne wybranych elementów roboczych maszyn rolniczych pracujących w glebie, wykonanych z nowoczesnych żeliw ADI. PIMR –TT-2/2003, Poznań.
- [6] Łabęcki M. i inni: Uruchomienie produkcji odlewów części zamiennych do maszyn rolniczych z wysokojakościowego, stopowego żeliwa sferoidalnego. Zadanie 2 (4). Opracowanie innowacyjnego kształtu modelu detali przeznaczonych na odlewy laboratoryjne. PIMR – TT – 3/2006
- [7] Łabęcki M. i inni: Uruchomienie produkcji odlewów części zamiennych do maszyn rolniczych z wysokojakościowego, stopowego żeliwa sferoidalnego. Zadanie 3 (9). Badania tribologiczne wykonanych odlewów eksperymentalnych. PIMR- TT-1/2007
- [8] Napiórowski J.: Zużyciowe oddziaływanie gleby na elementy robocze narzędzi rolniczych (rozprawa habilitacyjna). Wyd. PTIR, Kraków 2005.

Badania realizowano w ramach projektu strukturalnego UE WKP_1/1.4.1/1/2005/12/12/229 z udziałem konsorcjum (IO w Krakowie, PIMR w Poznaniu, MET-CHEM w Pilźnie).