



POLISH ACADEMY OF SCIENCES - COMMITTEE OF MATERIALS SCIENCE
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY OF GLIWICE
INSTITUTE OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
ASSOCIATION OF ALUMNI OF SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Conference
Proceedings

12th INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE

ACHIEVEMENTS IN MECHANICAL & MATERIALS ENGINEERING

Identyfikacja charakterystyk tarcia statycznego determinujących przebieg zużywania ściernego stali ŁH-15

T. Kałdoński

Wydział Mechaniczny WAT, 00-908 Warszawa
ul. S. Kaliskiego 2, tel.: 683-91-40

W pracy przedstawiono wyniki badań identyfikacyjnych charakterystyk tarcia statycznego determinujących przebieg procesu zużywania ściernego stali ŁH-15 ziarnami umocowanymi (rylcami). Określono maksymalną siłę tarcia statycznego T_{st} i współczynnik tarcia statycznego μ_{st} w funkcji obciążenia normalnego N , twardość ziarna ściernego H_a i promienia zaokrąglenia ostrza ziarna r_z . Uzyskane wyniki pozwoliły na sformułowanie nieco odmiennych poglądów od powszechnie przyjętych w literaturze tribologicznej.

1. WPROWADZENIE

Jednym z najważniejszych czynników zewnętrznego oddziaływania otoczenia na wszelkie systemy tribologiczne, tkwiącym niemal w każdym wzorze tribologicznym, jest obciążenie normalne. W badaniach odporności zużyciowej metali na papierach ściernych (Chruszczow [1, 2], Rabinowicz [3, 4], Tenenbaum [5, 6], Archard [7], Selwood [8], Nathan [9], Zum-Gahr [10, 11]...) stwierdzono, że wpływ obciążenia jest proporcjonalny do wartości zużycia i jego intensywności. W badaniach na papierach ściernych autorzy z reguły nie analizowali wpływu obciążenia na liczbę rzeczywistych styków powierzchni zużywanej z ziarnami ściernymi o różnej granulacji. Niektórzy autorzy np. Larsen-Badse [12, 13], Mulhern i Samuels [14], Miki Kobayashi [15], Sin [16], Wang i Hutchings [17], próbowali badać tę kwestię uzyskując rozbieżne wyniki. Przykładowo Larsen-Badse twierdził, że liczba styków jest wprost proporcjonalna do obciążenia normalnego, natomiast Spurr [18] oraz Miki Kobayashi [15], że raczej do kwadratowego pierwiastka zastosowanego obciążenia. Wymienieni autorzy nie uwzględniali różnej wytrzymałości ziaren ściernych na ściskanie ani topografii zużywanej powierzchni, co ma przecież zdecydowany wpływ na liczbę rzeczywistych styków [19, 20, 21]. Wniosek taki można odnieść do każdego rodzaju zużywania ściernego, co wymaga jednak przeprowadzenia badań identyfikacyjnych w warunkach tarcia suchego i ze smarowaniem.

Dla typowego zużywania ściernego ziarnami mineralnymi zarówno umocowanymi jak i swobodnymi, brak jest autorytatywnych teorii, takich jak teorie Kragielskiego, Tomlisona czy Bowdena dla tarcia suchego metali. Stąd brak uznanych zależności $\mu = f(N)$ i $T = f(N)$ dla tego rodzaju zużywania ($T = \mu \cdot N$). Na podstawie znanych teorii tarcia ślizgowego metali przyjmuje się, że dla styku plastycznego współczynnik tarcia nie zależy od obciążenia a dla styku sprężystego i sprężysto-plastycznego maleje ze wzrostem obciążenia normalnego, szczególnie w zakresie małych obciążeń [22, 23]. Natomiast wartość współczynnika tarcia statycznego zależy ponadto od czasu trwania styku. Wpływ taki został stwierdzony już przez

Coulomba, a później przez Bowdena i wielu współczesnych tribologów. Jeśli wziąć pod uwagę znikome promienie zaokrąglenia ostrzy ziaren mineralnych [19, 21] (łatwość ich zagłębiania się w powierzchnię zużywaną), to można domniemywać, że charakterystyki $T_{st} = f(N)$ i $\mu_{st} = f(N)$ będą miały inny przebieg, niż to się powszechnie przyjmuje na podstawie wymienionych wcześniej teorii tarcia suchego ślizgowego. W związku z tym inny może być również wpływ stosunku twardości ścierniwa i zużywanego metalu H_a/H_m oraz promienia zaokrąglenia ostrza od podawanego wcześniej w literaturze [2, 23, 24, 25]. Objasnienie tych zagadnień wymaga szczegółowych badań identyfikacyjnych dla przypadku tarcia suchego i ze smarowaniem. Autor przeprowadził takie badania identyfikacyjne opisując proces zużywania ściernego hydraulicznych par precyzyjnych typu T-C (tłok-cylinder, nurnik-tuleja) i opracowując elementarny model zużywania ściernego par precyzyjnych T-C luźnymi, pojedynczymi ziarnami mineralnymi zakleszczonymi w luzie promieniowym pary precyzyjnej, co opisano m.in. w pracach [21, 28, 29, 30]. Wyniki tych badań nie były dotychczas oddzielnie opublikowane.

2. ZAKRES I METODOLOGIA BADAŃ

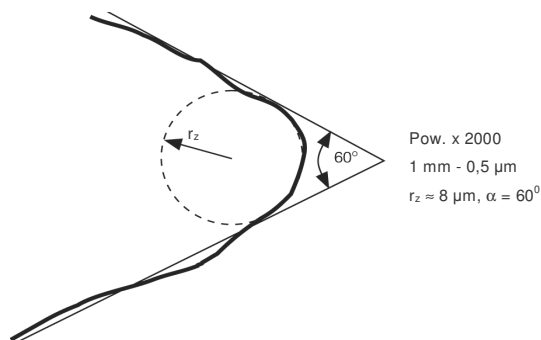
W celu szczegółowego rozpoznania mechanizmu działania ziaren ściernych o różnym promieniu i kącie wierzchołkowym ostrza oraz różnym kącie natarcia (ataku) przeprowadzono badania modelowe na zmodernizowanym tribometrze. Badania dotyczyły rzeczywistych elementów par T-C wykonanych ze stali ŁH-15 oraz umocowanych ziaren ściernych. Jako ziarna umocowane stosowano rylce wykonane z materiałów, które stanowią podstawowe składniki zanieczyszczeń rzeczywistych spotykanych w olejach napędowych zasilających silniki o zapłonie samoczynnym, tzn. z tlenku aluminium (Al_2O_3) oraz kwarcowe (99,5% SiO_2). Drugim kryterium wyboru rylców była ich twardość. Zastosowano rylce o twardości zbliżonej lub większej od twardości materiału par T-C, tzn. stal SW-18, węgliki spiekane S-30 i H-10. Skład chemiczny oraz istotne właściwości fizyczne materiałów, z których wykonano rylce przedstawiono w tabelicy 1.

Tabela 1. Właściwości fizyczno-chemiczne materiałów zastosowanych na rylce [26, 27]

Nazwa i symbol materiału	Skład chemiczny (procentowa zawartość głównych składników) [%]				Mikrotwardość zmierzona PIMT-3 μHV [kG/mm^2]	Współczynnik przewodności cieplnej [$W/m \cdot K$]
	WC	TiC+TaC+NbC	Co			
Węgiel spiekany S30	87	5	8		1526	29,3
Węgiel spiekany H10	94		6		1703	29,3
Stal szybkotnąca SW18	C 0,75 ÷ 0,85	Cr 3,4 ÷ 3,5	W 17 ÷ 19	V 1,0 ÷ 1,4	812	50,2
Korund (spiekane tlenki) Al_2O_3	~99,8% Al_2O_3				2060	30,1
Kwarc SiO_2	~99,5% SiO_2				1064	12,2

Średnia mikrotwardość powierzchni elementów par T-C w obszarze zużywanym rylcami wynosiła $\mu HV = 806$ [kG/mm^2] ($\times 9,81$: [N/mm^2]). W związku z tym stosunki twardości ścierniwa H_a do twardości zużywanego metalu H_m ($H_a/H_m = K_t$) wynosiły: dla SW18 - $K_t = 1,01$, dla SiO_2 - $K_t = 1,32$, dla S-30 - $K_t = 1,89$, dla H-10 - $K_t = 2,11$, dla Al_2O_3 - $K_t = 2,56$.

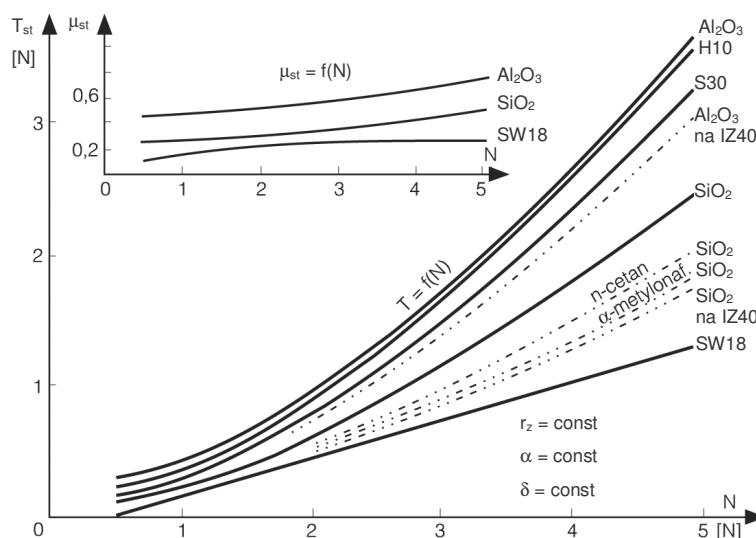
W pierwszym etapie badań modelowych oceniono siłę tarcia i współczynnik tarcia statycznego. Badania prowadzono ze wszystkimi rylcami (tabl. 1) o promieniach zaokrąglenia ostrzy $3 \div 63 \mu\text{m}$, dla obciążeń normalnych 0,2 N; 0,5 N; 2 N i 5 N i kątów ataku δ' i ostrza α w zakresie od 30 do 120° - podczas tarcia technicznie suchego i ze smarowaniem. Jako ciecze smarujące stosowano olej napędowy IZ-40, α -metylonafalen i n-cetan - co wynikało z celów monografii [21]. Mianowicie, olej napędowy IZ-40 jest naturalnym środowiskiem pracy par precyzyjnych T-C, a pozostałe dwie ciecze są paliwami wzorcowymi służącymi do oceny tzw. liczby cetanowej oleju napędowego i odwzorowującymi jego podstawowe składniki. Do pomiarów promieni i kątów ostrzy wszystkich rylców zastosowano kombinowaną metodę mikroskopowo-fotograficzną, podobnie jak dla zanieczyszczeń rzeczywistych i testowych. Stosowano mikroskop o dużej głębi ostrości (30-G 667-1, Carl-Zeiss Jena) a sfotografowany obraz powiększono metodą projekcyjną. Otrzymano powiększenie obrazu $\times 2000$. Na rysunku 1 pokazano przykład zarysu ostrza rylca uzyskany taką metodą, na którym zaznaczono promień zaokrąglenia i kąt wierzchołkowy ostrza.



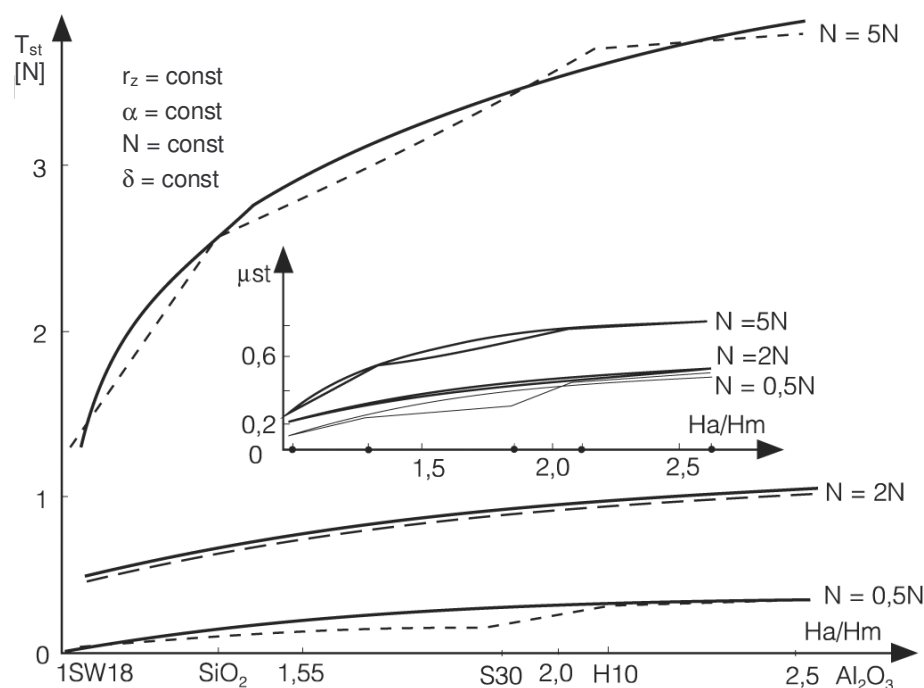
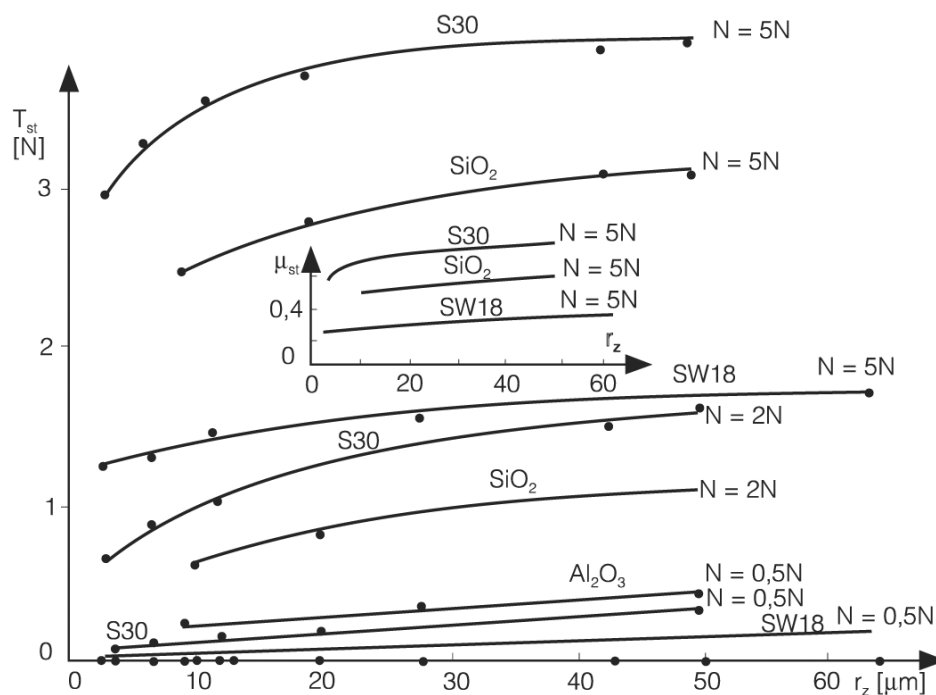
Rys. 1. Przykład zarysu ostrza rylca określonego metodą mikroskopowo-projekcyjną

2. PRZEBIEG I WYNIKI BADAŃ

Na kolejnych rysunkach (rys. 2 ÷ 4) przedstawiono uzyskane zależności T_{st} i μ_{st} od obciążenia normalnego, stosunku twardości H_a/H_m oraz promienia zaokrąglenia ostrza ziarna - przy tarcu technicznie suchym i ze smarowaniem.



Rys. 2. Zależność T_{st} i μ_{st} od obciążenia normalnego

Rys. 3. Zależność T_{st} i μ_{st} od twardości ryłkaRys. 4. Zależność T_{st} i μ_{st} od promienia zaokrąglenia ostrza ryłka

Zależność T_{st} i μ_{st} od obciążenia (rys. 2), niezależnie od stosunku H_a/H_m i promienia zaokrąglenia ostrza, była nieliniowa i rosnąca - dokumentująca możliwość łatwiejszego wnikania ostrza ziarna w materiał próbki przy większym obciążeniu i w związku z tym konieczność ścięcia większej powierzchni ($S = P/\tau_s$), przy praktycznie niezmięnionej wytrzymałości na ścinanie materiału zużywanego ($\tau_s \cong \text{const}$). Rejestrowano wgłębienie, odkształcenie plastyczne i doraźny

proces zużywania ściernego szczególnie, gdy materiał ziarna był odpowiednio twardy a promień zaokrąglenia ostrza niewielki. Taki przebieg procesów wydaje się charakterystyczny dla ściernych, twardych ziaren mineralnych a przebieg krzywych ma niewiele wspólnego z ogólnie uznanymi poglądami na temat zależności $T = f(N)$ i $\mu = f(N)$, sformułowanymi na podstawie badań współpracy dwóch metalowych powierzchni. Uzyskane zależności $\mu_{st} = f(N)$ mają nieco inny przebieg, niż to się powszechnie przyjmuje na podstawie znanych teorii tarcia suchego ślizgowego. W swoich badaniach autor zarejestrował wzrost współczynnika μ_{st} . Na powierzchni próbek stwierdzono wyraźne rysy odpowiadające początkowej fazie ruchu ryłca, świadczące o jego nieznacznym zagłębieniu się w materiał próbki. Zaistniał w tym momencie tzw. „efekt ostrza”. W kolejnej fazie ruchu efekt ten zanika, ostrze ulega zniszczeniu a współczynnik tarcia staje się stabilny, zgodnie z uznanymi teoriami tarcia suchego ślizgowego. W przypadku par T-C najistotniejsze znaczenie ma początkowa faza oddziaływania ziarna, ze względu na dynamikę pracy systemu hydraulicznego, w którym te elementy pracują tzn. pompy wtryskowej silnika o zapłonie samoczynnym.

Na zarejestrowaną znaczną wartość i przyrost współczynnika tarcia w zakresie małych obciążeń może mieć wpływ m.in. nagromadzenie się w strefie styku ładunków elektrostatycznych, powodujących wzrost przyciągania między powierzchnią zużywaną i ziarnami ściernymi.

Powyższe stwierdzenie wiąże się z niezaprzeczalnym wpływem czasu trwania styku statycznego na wartość T_{st} i μ_{st} . W przypadku omawianego procesu zużywania ściernego wydłużenie czasu trwania statycznego styku ziarna ze zużywaną powierzchnią ułatwia wgłębienie się ostrza ziarna w tę powierzchnię. W efekcie wartość współczynnika tarcia statycznego μ_{st} jest większa.

W zakresie wpływu stosunku $K_t = H_a/H_m$ (rys. 3) oraz promienia zaokrąglenia ostrza ziarna ściernego (rys. 4) na wartość T_{st} i μ_{st} również uzyskano nieco odmienne rozstrzygnięcia od proponowanych w literaturze. Dla każdej z przyjmowanych wartości stosunku H_a/H_m stwierdzono rysowanie bądź mikroskrawanie, chociaż dla $K_t \sim 1$ efekt rzeczywiście był zupełnie znikomy. Dla pozostałych K_t rysowanie i mikroskrawanie było ewidentne. Stabilizacja T_{st} i μ_{st} następowała dopiero dla $K_t \sim 1,5$. Podobnie, stabilizację T_{st} i μ_{st} rejestrowano dla promieni zaokrąglenia ostrza ziarna przewyższających $20\mu m$, gdy „efekt ostrza” już zanikał. Dla bardzo małych obciążeń ($\leq 0,5 N$) taka stabilizacja następowała nawet przy mniejszym promieniu zaokrąglenia ostrza ziarna, poniżej $10\mu m$. Natomiast podczas zmian kąta natarcia od $30 \div 110^\circ$ uzyskiwano wyraźne zmniejszenie siły tarcia dla kątów mniejszych od 60° oraz nieznacznym, stopniowym wzrostem siły tarcia dla kątów powyżej 60° .

3. ZAKOŃCZENIE

Na zakończenie tego artykułu należy wyrazić nadzieję, że inni badacze zainteresowani problematyką zużywania ściernego zechcą zweryfikować wyżej opisane wyniki realizując swoje badania w innych warunkach laboratoryjnych, stosując inne materiały na próbki i przeciwpróbki, co w efekcie pozwoliłoby w przyszłości na uściślenie istniejących poglądów na temat tarcia statycznego jako etapu wstępnego do procesu zużywania ściernego metali.

LITERATURA

1. Н Хрущов М. М., Бабичев М. А.: Исследования изнашивания металлов. Ивд. А. Н. СССР, Москва 1960.
2. Хрущов М. М.: Закономерности образивного изнашивания. Наука, Москва 1975.

3. Rabinowicz E.: The formation of spherical wear particles. *Wear*, Vol. 42, No 1, 1977, pp. 49-156.
4. Rabinowicz E., Mutis A.: Effect of abrasive particle size on wear. *Wear*, Vol. 8, No 5, 1965, pp. 381-390.
5. Тененбаум М. М.: Сопротивление абразивному изнашиванию. Машиностроение, Москва 1976.
6. Тененбаум М. М.: Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин. Машиностроение, Москва 1966.
7. Archard J. F.: Contact and rubbing of flat surface. *Jour. of Appl. Phys.*, Vol. 24, No 8, pp. 981-988.
8. Selwood P. W.: Adsorption and collective paramagnetism. Academic Press, 1962.
9. Nathan G. K., Jones W. J. D.: The empirical relationship between abrasive wear and the applied conditions. *Wear*, Vol. 9, No 4, 1966, pp. 300-309.
10. Zum-Gahr K. H.: Microstructure and wear of materials. Elsevier, Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo 1987.
11. Zum-Gahr K. H.: Modelling of two-body abrasive wear. *Wear*, Vol. 124, No 1, 1988, pp. 87-103.
12. Larsen-Badse J.: Influence of grit size on the groove formation during sliding abrasion. *Wear*, Vol. 11, No 3, 1968, pp. 213-222.
13. Larsen-Badse J.: Influence of grit diameter and specimen size on wear during sliding abrasion. *Wear*, Vol. 12, No 1, 1968, pp. 35-53.
14. Mulhearn T. O., Samuels L. W.: The abrasion of metals: a model of the process. *Wear*, Vol. 5, No 6, 1962, pp.478-498.
15. Miki H., Kobayashi S.: An equation for the centreline average roughness of material sliding against abrasive paper. *Wear*, Vol. 65, No 1, 1980, pp. 47-53.
16. Sin H., Saka N., Sun N. P.: Abrasive wear mechanisms and the grit size effect. *Wear*, Vol. 55, No 1, 1979, pp. 163-190.
17. Wang A. G., Hutchings J. M.: The number of particle contacts in two-body abrasive wear of metals by coated abrasive papers. *Wear*, Vol. 129, No 1, 1989, pp. 23-35.
18. Spur R. T.: The nature of contact during abrasion. *Wear*, Vol. 67, No 3, 1981, pp. 375-379.
19. Kałdoński T.: New model and method assessment of cutting erosion. *Arch. Bud. Masz.*, Vol. XLIII, z. 4, 1996, p. 1-23.
20. Kałdoński T.: Metoda oceny ziaren ściernych na ścinanie. *Biuletyn WAT*, nr 7, 1997.
21. Kałdoński T.: Zużywanie ściernie w systemach tribologicznych typu tłok-cylinder. *Wyd. WAT*, Warszawa 1996.
22. Hebda H., Wachal A.: *Trybologia*. WNT, Warszawa 1980.
23. Solski P., Ziemia S.: *Zagadnienia tarcia suchego*. PWN, Warszawa 1965.
24. Хрущов М. М., Бабичев М. А.: *Абразивное изнашивание*. Наука, Москва 1970.
25. Тененбаум М. М.: Сопротивление абразивному изнашиванию. Машиностроение, Москва 1976.
26. Ciszewski B., Przetakiewicz W.: *Nowoczesne materiały stosowane w technice*. WAT, Warszawa 1989.
27. Polskie Normy: PN-88/H-89500. Węgliki spiekane. Gatunki, PN-86/H-85022. Stal szybko tnąca. Gatunki, PN-74/H-84041. Stal na łożyska toczne, PN-79-/H-04361-1. Pomiar twardości metali sposobem Vickers'a przy obciążeniu poniżej 9,8 N, PN-78/H-04360. Pomiar twardości metali sposobem Vickers'a przy obciążeniu 9,8 ÷ 980 N, PN-76/H-04660. Żeliwo i staliwo. Badania mikroskopowe. Pobieranie i przygotowanie próbek, PN-81/M-53854-04. Charakterystyki termoelementów. Termoelement J (Fe-CuNi), PN-76/C-04147. Badania właściwości smarnych olejów i smarów...
28. Kałdoński T.: Metodologia oceny zużycia ściernego hydraulicznych par precyzyjnych. *Biuletyn WAT*, nr 1, 2003.
29. Kałdoński T.: Klasyfikacje i definicje zużycia ściernego. *Biuletyn WAT*, nr 3, 2003.
30. Kałdoński T.: Modele i parametry oceny zużywania ściernego. *Biuletyn WAT*, nr 3, 2003.