

TRIBOLOGIA 5/2003 (191)

TEORIA I PRAKTYKA

DWUMIESIĘCZNIK NAUKOWO-TECHNICZNY SIMP ROK XXXIV
WYDAWANY WE WSPÓLPRACY Z POLSKIM TOWARZYSTWEM TRIBOLOGICZNYM
I INSTYTUTEM TECHNOLOGII EKSPLOATACJI W RADOMIU

TRIBOLOGIA

Czasopismo dofinansowane przez Komitet Badań Naukowych

Adres redakcji:

ul. K. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, tel. (048) 364-42-41, w. 223, fax (048) 3644765
e-mail: tribologia@itee.radom.pl e-mail: marian.szczerek@itee.radom.pl
http://www.itee.radom.pl/tribolog

REDAGUJE ZESPÓŁ

Redaktor naczelny: dr hab. inż. Marian Szczerek, prof. ITeE
Zast. Redaktora naczelnego: dr hab. inż. Marek Wiśniewski, prof. ITeE
Sekretarz redakcji: mgr inż. Krzysztof Grzegorzczak

RADA PROGRAMOWA

Przewodniczący: prof. zw. dr hab. inż. Stanisław Pytko

Członkowie: prof. zw. dr hab. inż. Tadeusz Burakowski, prof. dr hab. inż. Jan Burcan,
prof. zw. dr hab. inż. Monika Gierzyńska-Dolna, prof. zw. dr hab. inż. Janusz Janecki,
prof. zw. dr hab. inż. Czesław Kajdas, prof. dr hab. inż. Jan Kiciński, prof. dr hab. inż. Piotr Kula,
prof. dr hab. inż. Jerzy Łunarski, prof. zw. dr hab. inż. Ryszard Marczak,
prof. dr hab. inż. Stanisław Mitura, dr inż. Witold Piekoszewski, prof. dr hab. inż. Jan Senatorski,
prof. dr hab. inż. Marian Włodzimierz Sułek, prof. dr hab. inż. Stanisław F. Ścieszka,
prof. zw. dr hab. inż. Bolesław Wojciechowicz

oraz

prof. Wilfried J. Bartz (RFN), prof. Pavel Blaškovič (Słowacja),
prof. Awtańdił W. Cziczinadze (Rosja), prof. Gerd Fleischer (RFN),
prof. Friedrich Franek (Austria), prof. Michael J. Furey (USA),
prof. Zygmunt Haduch (Meksyk), prof. Weimin Liu (Chiny),
prof. H. Peter Jost (President International Tribology Council, Wielka Brytania),
prof. Anatoly I. Sviridenok (Białoruś)

Indeks 37913

Nakład 300 egz.

PL ISSN 0208-7774

OFICyna WYDAWNICZA SIMP



ul. Świętokrzyska 14A
00-050 Warszawa, skr. poczt. 7
tel. (022) 827-26-05
(022) 826-74-61 ÷ 9 w. 478

POLSKIE TOWARZYSTWO TRIBOLOGICZNE

al. Żwirki i Wigury 31,
02-091 Warszawa



INSTYTUT TECHNOLOGII EKSPLOATACJI
ul. K. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom

Skład i druk: Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu

TREŚĆ

Janusz DASIEWICZ, Zbigniew PAWELEC Ślizgowy termoutwardzalny kompozyt metalożycowy na elementy łożysk poprzecznych	11
Jolanta DRABIK, Ewa PAWELEC, Janusz JANECKI Charakterystyka biodegradowalnych baz olejowych ekologicznych smarów plastycznych	21
Eugene FELDSHTEIN Modelowanie fizyczne procesów zużycia noży z materiałów supertwardych	37
Jadwiga JANOWSKA, Zenobia RŻANEK-BOROCH, Magdalena EKWIŃSKA Zastosowanie mikroskopu sił atomowych do badania własności tarciovych ultracienkich powłok	49
Wiesław LESZEK Rozważania o podstawach tribologii. 2. Procesy dyferencjacji i integracji wiedzy tribologicznej	63
Wiesław LESZEK Rozważania nad podstawami tribologii. 3. Współdziałanie tribologii z naukami przyrodniczymi	73
Anna MATUSZEWSKA, Marian GRĄDKOWSKI Badanie roli dodatków AW/EP w przemianach warstwy wierzchniej przy obciążeniu zacierającym	85
Remigiusz MICHALCZEWSKI, Witold PIEKOSZEWSKI, Marian SZCZEREK Wpływ dodatków typu AW/EP na powierzchniową trwałość zmęczeniową elementów z powłoką TiN	97

Jarosław MOLENDĄ, Marian GRĄDKOWSKI Tribochemiczne oddziaływania pomiędzy dialkilotiofosforanem cynku oraz 3-alliloksy- 1,2 propandiolem	109
Karol NADOLNY, Jarosław SELECH, Przemysław TYCZEWSKI Zmiany struktury geometrycznej powierzchni powstałe podczas testów zużyciowych	121
Karol NADOLNY, Przemysław TYCZEWSKI Eksperymentalne wyniki badań jednoczesnego zużycia mechaniczno-ściernokorozyjnego	133
Antoni NEYMAN, Paweł ROMANOWSKI, Leszek DĄBROWSKI Węzły cierne stabilizatora pola operacyjnego serca	145
Stanisław NOSAL, Jan GRZEŚKOWIAK Wykorzystanie współczynnika tarcia do oceny odporności na zużycie żeliwnego skojarzenia ślizgowego ...	157
Edyta OSUCH-SŁOMKA, Marian GRĄDKOWSKI Wpływ zawartości napelnacza na właściwości tarcia kompozytów politetrafluoroetylenu	167
Zbigniew PAWELEC, Janusz DASIEWICZ Analiza przydatności proszków metali i stopów jako napelniaczy ślizgowych kompozytów polimerowych ..	177
Paweł PIEC, Grzegorz ZAJĄC Wspomaganie komputerowe analizy procesu tarcia	189
Witold PIEKOSZEWSKI, Waldemar TUSZYŃSKI Właściwości przeciwzużyciowe, przeciwzatarciowe i trwałość zmęczeniowa węzła tarcia jako efekt rozdaju i stężenia dodatków smarowościowych w oleju	201

Tomasz ROCHATKA, Wiesław ZWIERZYCKI Rozwinięcia idei M.M. Chruščova wersja współczesna	219
Elżbieta ROGOŚ Wpływ uzdatniania na właściwości tribologiczne olejów sprężarkowych	229
Elżbieta ROGOŚ, Andrzej URBAŃSKI, Joanna KARAŚ Właściwości tribologiczne siarkowanych olejów roślinnych	241
Jan SADOWSKI, Leszek SARNOWICZ Badania kalorymetryczne składowej cieplnej i mechanicznej oporów tarcia	251
Piotr SADOWSKI Badania modelowe odporności na zużywanie ścierny wybranych gatunków staliw	261
J. SENATORSKI, B. SIEPRACKA Zapobieganie tribokorozji przez obróbkę cieplno-chemiczną	271
B. SIEPRACKA, J. SZUMNIAK, S. STAWARZ Wpływ rodzaju osnowy na właściwości tribologiczne kompozytów ślizgowych z dyspersją teflonową ...	283
Jan SIKORA Badania wytrzymałości zmęczeniowej panwi ślizgowych przy wirującym wektorze obciążenia	293
Elżbieta SIWIEC, Marian GRĄDKOWSKI Wpływ utleniania i hydrolizy na właściwości smarne oleju słonecznikowego	307

Arkadiusz STACHOWIAK, Wiesław ZWIERZYCKI Obliczanie zużycia korozyjno-mechanicznego z wykorzystaniem teorii pęknięcia materiałów	317
Michał STYP-REKOWSKI Znaczenie smarowania w procesie eksploatacji tocznej pary kinematycznej	329
Włodzimierz SUŁEK, Tomasz WASILEWSKI, Anita BOCHO-JANISZEWSKA Właściwości tribologiczne roztworów monoglicerydów w oleju parafinowym	341
Tomasz TRZASKACZ, Czesław KOZIARSKI Metoda, stanowisko i badania wstępne własności tribologicznych chrząstki stawowej	347
Włodzimierz WALIGÓRA, Michał LIBERA Ocena nominalnej trwałości łożysk tocznych na podstawie badań skróconych	357
Krzysztof WIERZCHOLSKI Tribologia hodowli tkanki kostnej w bioreaktorze	369
Marek WIŚNIEWSKI, Michał CICHOMSKI Identyfikacja oporów ruchu i zużycia powłok niskotarciowych	384
Michał WODTKE Weryfikacja modelu hydrostatycznego i wspomaganie łożyska nośnego hydrogeneratora	395
Feliks WOJTKUN Problem zużywania tribologicznego staliwa w niskich temperaturach	409

Jacek PRZEPIÓRKA , Marian SZCZEREK Wpływ swobodnej energii powierzchniowej na charakterystyki tribologiczne polimerowo - metalowych węzłów tarcia ...	419
Marian SZCZEREK, Jacek PRZEPIÓRKA Mechanizmy zużycia polimerowo-metalowych węzłów tarcia	427
Andrzej Antoni CZAJKOWSKI Opis numeryczny parametrów pracy dla eliptycznego stawu biodrowego	447
Jarosław SĘP Trojwymiarowa hydrodynamiczna analiza łożyska z czopem ze śrubowym rowkiem	459

CONTENTS

Janusz DASIEWICZ, Zbigniew PAWELEC The sliding thermosetting metal-resinous composite for elements of radial bearings	11
Jolanta DRABIK, Ewa PAWELEC, Janusz JANECKI Characteristic of the biodegradable base oils of ecological greases	21
Eugene FELDSHTEIN Physical modeling of wear process of superhard material cutters	37
Jadwiga JANOWSKA, Zenobia RŻANEK-BOROCH, Magdalena EKWIŃSKA Application of atomic force microscope to study frictional properties of ultrathin films	49
Wiesław LESZEK Consideration of tribology basis. Part 2. Processes of tribological knowledge differentiation and integration	63
Wiesław LESZEK Discussion about fundamental problems of tribology. Part 3. Cooperation among tribology and biological science	73
Anna MATUSZEWSKA, Marian GRĄDKOWSKI The influence of AW/EP additives on the surface layer changes under scuffing load	85
Remigiusz MICHALCZEWSKI, Witold PIEKOSZEWSKI, Marian SZCZEREK The effect of AW/EP additives on rolling contact fati- gue of TiN coated parts	97

Jarosław MOLENDĄ, Marian GRĄDKOWSKI Tribochemical interactions between zinc dialkyldithiophosphate and 3-allyloxy-1,2-propandiol	109
Karol NADOLNY, Jarosław SELECH, Przemysław TYCZEWSKI The influence of abrasive-corrosive wear on change of surface roughness	121
Karol NADOLNY, Przemysław TYCZEWSKI The experimental results of investigations of simultaneous wear abrasive corrosive	133
Antoni NEYMAN, Paweł ROMANOWSKI, Leszek DĄBROWSKI Friction joints of surgical area heart stabilizer	145
Stanisław NOSAL, Jan GRZEŚKOWIAK Using the coefficient of friction to assess the wear resistance of cast iron sliding connections	157
Edyta OSUCH-SŁOMKA, Marian GRĄDKOWSKI Influence of fillers on frictional properties of polytetrafluoroethylene (PTFE) composites	167
Zbigniew PAWELEC, Janusz DASIEWICZ Assessment of suitability of powdered metals and alloys as fillers in polymer composites for sliding tribosystems	177
Paweł PIEC, Grzegorz ZAJĄC Computer aided analysis of friction process	189
Witold PIEKOSZEWSKI, Waldemar TUSZYŃSKI An effect of the type and concentration of lubricating additives of AW/EP properties and rolling fatigue life of a tribosystem	201

Tomasz ROCHATKA, Wiesław ZWIERZYCKI The contemporary version of the continuation of Krushchev's concept	219
Elżbieta ROGOŚ An influence of treatment of compressor oils on their tribological properties	229
Elżbieta ROGOŚ, Andrzej URBAŃSKI, Joanna KARAŚ Tribological properties of sulfurized vegetable oils ...	241
Jan SADOWSKI, Leszek SARNOWICZ Calorimetric research of the thermal and mechanic components of friction resistance	251
Piotr SADOWSKI Model research of the resistance to abrasive wear of the chosen kinds of cast steel	261
J. SENATORSKI, B. SIEPRACKA Prevention against tribocorrosion throughout thermochemical treatment	271
B. SIEPRACKA, J. SZUMNIAK, S. STAWARZ Influence of kind matrix for tribological properties of the slide composites with PTFE dispersion	283
Jan SIKORA Experimental investigation of slide bushes fatigue strength under conditions of rotary load vector	293
Elżbieta SIWIEC, Marian GRĄDKOWSKI Influence of oxidation and hydrolysis on sunflower oil lubricity	307

Arkadiusz STACHOWIAK, Wiesław ZWIERZYCKI Corrosive and mechanical wear calculation at help of crack propagation theory	317
Michał STYP-REKOWSKI Significance of lubrication in operation process of rolling pair	239
Włodzimierz SUŁEK, Tomasz WASILEWSKI, Anita BOCHO-JANISZEWSKA Tribological properties of monoglycerides paraffin oil solutions	341
Tomasz TRZASKACZ, Czesław KOZIARSKI Method, test setup and introduction to tribological investigation of articular cartilage	347
Włodzimierz WALIGÓRA, Michał LIBERA The estimation of roller bearings conventional life calculated on the basis of reduced test	357
Krzysztof WIERZCHOLSKI Tribology of bone tissue culture in bioreactor	369
Marek WIŚNIEWSKI, Michał CICHOMSKI Identification of friction and wear of anti-wear coatings	384
Michał WODTKE Verification of a model of hydrostatic lifting of a water turbine thrust bearing	395
Feliks WOJTKUN The problem of tribological wear of cast steel in low temperatures	409

Jacek PRZEPIÓRKA , Marian SZCZEREK An effect of the free surface energy on tribological characteristics for polymer - metal tribosystem	419
Marian SZCZEREK, Jacek PRZEPIÓRKA Wear mechanisms of polymer-metal tribosystem	427
Andrzej Antoni CZAJKOWSKI Numerical description of working parameters for human elliptical hip joint	447
Jarosław SĘP Three-dimensional hydrodynamic analysis of helically grooved journal bearings	459

Janusz DASIEWICZ*, Zbigniew PAWELEC*

**ŚLIZGOWY TERMOUTWARDZALNY KOMPOZYT
METALOŻYWICZNY NA ELEMENTY ŁOŻYSK
POPZRZECZNYCH**

**THE SLIDING THERMOSETTING METAL-RESINOUS COM-
POSITE FOR ELEMENTS OF RADIAL BEARINGS**

Słowa kluczowe:

Kompozyt polimerowy, żywice fenolowo-formaldehydowe, rozszerzalność cieplna, współczynnik tarcia

Keywords:

Polymer composite, phenol and formaldehyde resin, thermal expansion, friction coefficient

Streszczenie

W artykule przedstawiono wstępne wyniki badań nad opracowaniem ślizgowego kompozytu termoutwardzalnego, który będzie można stosować na elementy konstrukcyjne maszyn i urządzeń. Celem przedstawionych

* Instytut Technologii Eksploatacji w radomiu, ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, tel. (048) 36-442-41.

w artykule badań było sprawdzenie możliwości i zakresu optymalizacji właściwości materiałów kompozytowych przez dobór osnowy kompozytu, napełniaczy metalicznych i dodatków funkcyjnych wpływających na właściwości kompozytu polimerowego. Dokonano oceny wpływu osnowy kompozytu i napełniaczy na wybrane właściwości fizyko mechaniczne, cieplne i tribologiczne. Charakterystyki tribologiczne kompozytów określono na maszynie tarciowej typu rolka kłoczek, w której testowy węzeł tarcia imituje łożysko ślizgowe.

WPROWADZENIE

Kompozyty konstrukcyjne stanowią bardzo dużą i zróżnicowaną grupę materiałów. Różnią się rodzajem użytych składników, kształtem i wymiarami komponentu umacniającego, technologią wytwarzania itp., ale mają wspólną cechę – wysokie wskaźniki wytrzymałościowe. Najprostszą koncepcją kompozytu konstrukcyjnego sprowadza się do rozmieszczenia w osnowie drugiej fazy, zwykle sztywniejszej niż osnowa.

Cennymi zaletami polimerów jest możliwość łatwego formowania elementów o złożonych kształtach, duża trwałość podczas pracy w warunkach korozyjnych, dobre właściwości tribologiczne oraz niski koszt materiału. Oprócz wielu korzystnych cech należy uwzględnić i to, że mogą pracować w warunkach tarcia technicznie suchego. Wadami tworzyw są przede wszystkim słabe właściwości mechaniczne, możliwość zmiany właściwości i wymiarów wskutek zmian warunków otoczenia np. temperatury. W celu poprawy właściwości mechanicznych stosuje się metody łączenia tworzyw z różnymi napełniaczami, dotyczy to głównie właściwości mechanicznych i cieplnych. Cechy użytkowe żywic nie napełnionych są niskie jednak wzmocnienie ich odpowiednimi napełniaczami np. proszkami metali lub włóknami daje dobre efekty w postaci poprawy ich właściwości [L. 1, 2, 3, 5].

Kompozyty polimerowe stosowane na konstrukcyjne elementy maszyn charakteryzują się na ogół dużą odpornością chemiczną, co oznacza wyeliminowanie podczas pracy skojarzeń trących destrukcyjnego działania tlenu oraz korodującego działania wody, oleju i smarów. Tak korzystny zespół właściwości materiałów polimerowych umożliwia stosowanie ich jako materiały konstrukcyjne przeznaczone między innymi na elementy łożysk ślizgowych. Analiza literatury i wstępne wyniki badań w dziedzinie kształtowania tworzyw, w których osnową w przeważającej ilości przy-

padków jest polimer termoutwardzalny, żywica fenolowo-formaldehydowa, sugeruje możliwość uzyskania kompozytu niskotarciowego, metalożywicznego o dobrych właściwościach mechanicznych i termicznych [L. 4, 6, 7].

WYNIKI BADAŃ WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH I CIEPLNYCH

Przedmiotem badań były różne rodzaje nawolakowych tłoczyw termoutwardzalnych. Stanowiły one także matryce opracowywanych kompozytów konstrukcyjnych. Termoutwardzalne osnowy kompozytów charakteryzują się między innymi wysoką odpornością cieplną i dobrą odpornością na ścieranie. Jako napełniacze zastosowano między innymi sproszkowane metale (Fe) zwiększające przewodność cieplną a w celu zwiększenia własności mechanicznych wprowadzono napełniacze włókniste (włókno aramidowe). Dodatkami funkcyjnymi były smary stałe obniżające współczynnik tarcia i jednocześnie poprawiające przewodność i odporność cieplną.

Tabela 1. Składy kompozytów poddane badaniom

Table 1. Composition of the investigated composites

Składniki kompozytu	Nazwa kompozytu				
	KT1	KT2	KT3	KT4	KT5
Polofen 1	X	-	-	X	-
Polofen 2	-	X	-	-	X
Polofen 3	-	-	X	-	-
Napełniacze proszkowe	-	-	-	X	X
Napełniacze włókniste	-	-	-	X	X
Dodatki funkcyjne	-	-	-	X	X

Dla zastosowanych termoutwardzalnych żywic polimerowych jak również materiałów kompozytowych na ich osnowie dokonano pomiarów podstawowych parametrów fizykomechanicznych. Z prób statycznych dokonano pomiarów twardości i wytrzymałości na ściskanie a z prób dynamicznych wyznaczono udarność metodą Charpy. Otrzymane wyniki badań przedstawiono w tabeli.

Tabela 2. Właściwości fizykomechaniczne badanych materiałów

Table 2. The physical and chemical properties of the investigated materials

Symbol próbki	KT 1	KT 2	KT 3	KT 4	KT 5
Twardość [MPa]	550	575	464	553	754
Udarność [kJ/m ²]	1,1	1,5	0,7	1,6	2,4
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	164	151	153	173	167

Analizując otrzymane wyniki badań właściwości wytrzymałościowych tłoczyw fenolowo-formaldehydowych wykorzystanych jako osnowy kompozytów polimerowych możemy stwierdzić, że najniższe wartości mierzonych parametrów fizykomechanicznych uzyskano dla Polofenu 3. Próbki wykonane z tego tworzywa miały małą twardość i szczególnie niska udarność. Niskie parametry użytkowe tej osnowy polimerowej spowodowały, że materiały kompozytowe sporządzono tylko na osnowie Polofenu 1 i Polofenu 2. Wyniki pomiarów podstawowych parametrów fizykomechanicznych tych materiałów kompozytowych pozwalają wnioskować, że zastosowane napełniacze wpływają na poprawę mierzonych parametrów. W przypadku kompozytu oznaczonego symbolem KT 5 uzyskano ok. 40% wzrost twardości i udarności a także znaczną poprawę wytrzymałości na ściskanie.

Niezależnie od parametrów wytrzymałościowych jedną z istotniejszych właściwości mających wpływ na jakość współpracy tribologicznej jest szczególnie w przypadku polimerowych materiałów kompozytowych rozszerzalność cieplna. Na podstawie pomiarów wydłużenia próbki w funkcji temperatury na dylatometrze firmy Cosfeld wyznaczono współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej uzyskując następujące rezultaty p. **Tab. 3.**

Tabela 3. Współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej badanych materiałów.

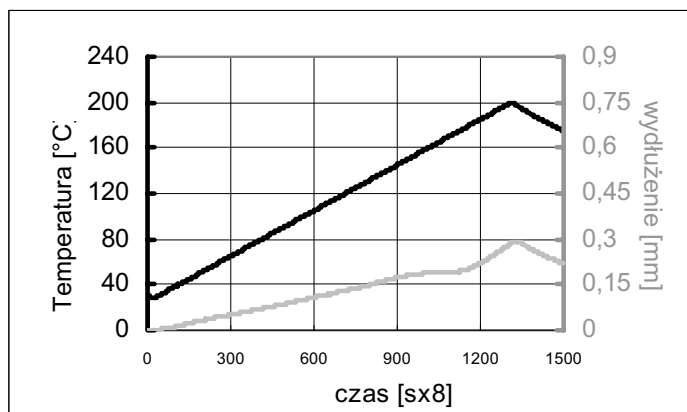
Table 3. Coefficient of linear thermal expansion of the investigated materials

Symbol próbki /	KT 1	KT 2	KT 3	KT 4	KT 5
Współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej [x10 ⁻⁶ C ⁻¹]	31	28	53	28	24

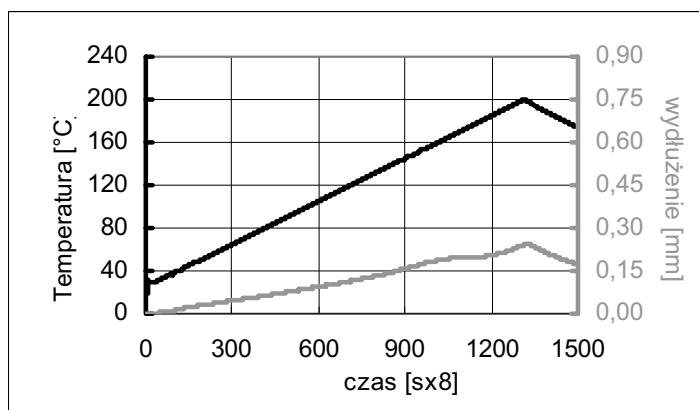
Uzyskane wyniki pomiarów współczynnika liniowej rozszerzalności cieplnej wskazują, że oprócz Polofenu 3 dla pozostałych materiałów jest

on stosunkowo niewielki i znacznie mniejszy niż np. dla tworzyw termoplastycznych i kompozytów polimerowych na osnowie żywic chemoutwardzalnych. Mniejsze wydłużenie próbki kompozytu KT 4 (**Rys. 2**) w porównaniu do jego osnowy (**Rys. 1**) wskazuje, że zastosowane napełniacze wpływają korzystnie na wielkość tego parametru. Obserwując przebieg zmian wydłużenia próbki możemy stwierdzić, że jest ono wprost proporcjonalne do temperatury.

Przykładowe przebiegi zmian wydłużenia próbki kompozytu w funkcji temperatury przedstawiono na rysunkach (**Rys.1 i 2**).



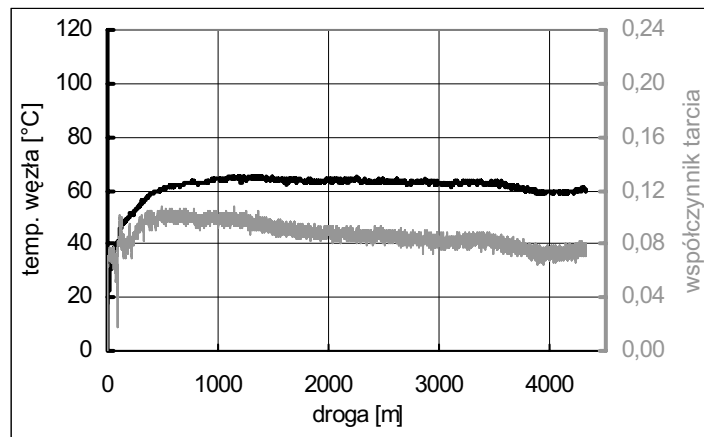
Rys. 1. Przebieg zmian wydłużenia próbki kompozytu KT 1 w funkcji temperatury
Fig. 1. The expansion curve versus temperature for KT 1 specimen



Rys. 2. Przebieg zmian wydłużenia próbki kompozytu KT 4 w funkcji temperatury
Fig. 2. The expansion curve versus temperature for KT 4 specimen

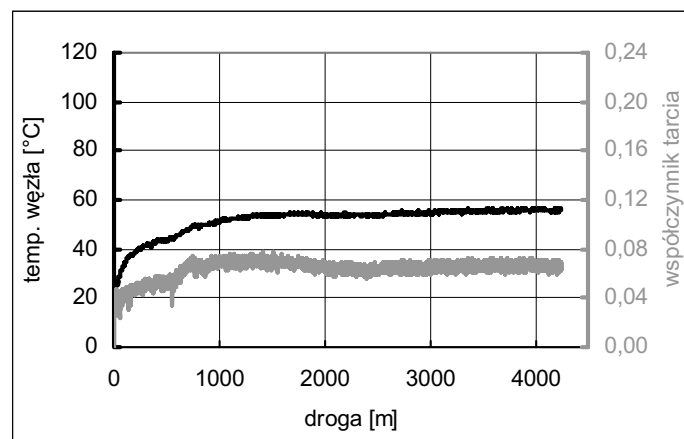
CHARAKTERYSTYKI TRIBOLOGICZNE KOMPOZYTÓW

Ponieważ opracowane materiały mają stanowić elementy łożysk ślizgowych ich charakterystyki tribologiczne wyznaczono na testerze T-05 typu rolka – klocek w następujących warunkach $P = 9$ i 12 MPa $v = 0,3$ m/s. Przykładowe charakterystyki tarciowo zużyciowe przedstawiono na wykresach (Rys. 3, 6).



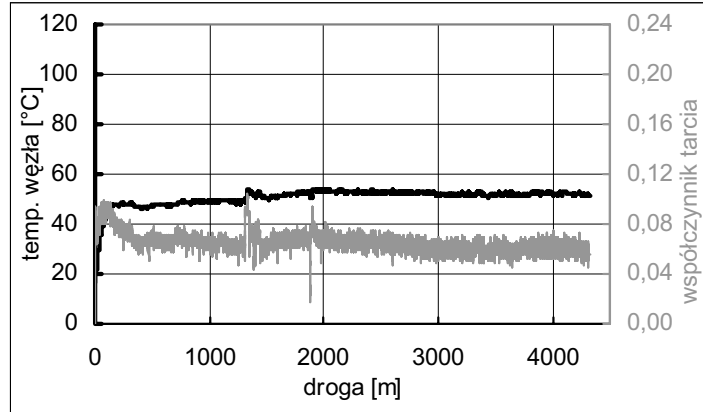
Rys. 3. Przebieg zmian współczynnika tarcia i temperatury węzła dla kompozytu KT 2 ($p=9$ MPa $v=0,3$ m/s)

Fig. 3. The friction couple temperature and friction force curves for KT1 composite ($p = 9$ MPa. $v = 0,3$ m/s)



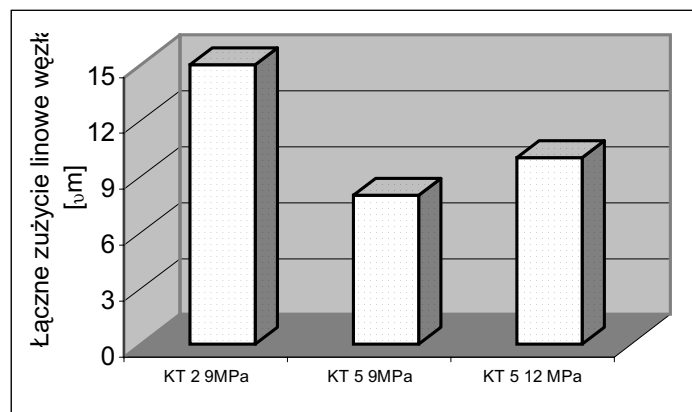
Rys. 4. Przebieg zmian współczynnika tarcia i temperatury węzła dla kompozytu KT 5 ($p=9$ MPa, $v = 0,3$ m/s)

Fig. 4. The friction couple temperature and friction force curves for KT5 composite ($p = 9$ MPa. $v = 0,3$ m/s)



Rys. 5. Przebieg zmian współczynnika tarcia i temperatury węzła dla kompozytu KT 5 ($p=12\text{ MPa}$, $v=0,3\text{ m/s}$)

Fig. 5. The friction couple temperature and friction force curves for KT 5 composite ($p=12\text{ MPa}$, $v=0,3\text{ m/s}$)



Rys.6. Zużycie liniowe węzła tarcia

Fig. 6. The linear wear of friction pair

Uzyskane charakterystyki tribologiczne opracowanego kompozytu polimerowego pozwalają stwierdzić, że rejestrowane parametry odznaczają się niską i ustabilizowaną wartością. Początkowo wyższa wartość współczynnika tarcia a następnie jego spadek może świadczyć o pewnym procesie docierania między współpracującymi powierzchniami. Porównując charakterystyki tribologiczne przedstawione na **Rys. 3 i 4** możemy wnioskować o korzystnym wpływie napelnaczy na opory ruchu a tym samym na temperaturę węzła tarcia. Średnia temperatura węzła obniżyła się o ok.

10°C a współczynnik tarcia o 0,02. Otrzymane charakterystyki tribologiczne dla zwiększonych nacisków jednostkowych wskazują na spadek oporów ruchu ze wzrostem obciążenia. We wszystkich przedstawionych charakterystykach tarciovych na uwagę zasługuje wysoka stabilność rejestrowanych parametrów, ponieważ o jakości współpracy tribologicznej świadczy nie tylko wartość współczynnika tarcia i temperatury węzła, ale również ich niezmiennosc w czasie.

Wielkość zużycia liniowego węzła tarcia zależy od składu jakościowego kompozytu. Pozytywnie na wielkość tego parametru wpływa udział napełniaczy i dodatków funkcyjnych.

PODSUMOWANIE

Uzyskane wstępne wyniki badań nad opracowaniem termoutwardzalnego kompozytu konstrukcyjnego na ślizgowe elementy maszyn sugerują, że możliwe jest opracowanie materiału o zadowalających parametrach użytkowych.

Właściwości badanych materiałów kompozytowych uzależnione są od rodzaju matrycy polimerowej. Zastosowane napełniacze i dodatki funkcyjne wpływają na poprawę parametrów fizykomechanicznych oraz obniżają współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej. Uzyskane wyniki badań tribologicznych wskazują, że współczynnik tarcia i temperatura węzła zależą od składu jakościowego materiałów. Współczynnik tarcia kompozytu KT-5 współpracującego ze stopem łożyskowym obniża się ze wzrostem nacisków. Ważną cechą charakterystyk tribologicznych napełnionych polimerów termoutwardzalnych jest wysoka stabilność rejestrowanych parametrów.

LITERATURA

1. Jurkowski B., Jurkowska B.: Sporządzanie kompozycji polimerowych. Elementy teorii i praktyki. WNT Warszawa 1995.
2. Kapuściński J., Puciłowski K., Wojciechowski S.: Projektowanie i technologia materiałów kompozytowych. Wydawnictwo PW Warszawa 1983.
3. Blicharski M.: Wstęp do inżynierii materiałowej. WNT Warszawa 1998.
4. Marczak R., Starczewski L., Szumniak J.: Termoutwardzalny kompozyt dla skojarzeń ślizgowych o niskich oporach tarcia i wysokiej odporności na zużycie. Tribologia 3/2001.

5. Wieleba W.: Tarcie i zużywanie kompozytów PTFE wypełnionych koksem i grafitem podczas współpracy ze stalą w warunkach tarcia suchego. Tribologia 4/2002.
6. Floriańczyk Z., Penczek S.: Chemia polimerów. Oficyna wydawnicza PW Warszawa 2001.
7. Wilczyński A.: Polimerowe kompozyty włókniste. WNT Warszawa 1996.

Recenzent:
Janusz JANECKI

Summary

The paper presents the results of preliminary investigations aiming at elaboration of thermosetting composite intended for sliding elements of machine parts. The presented works aimed at checking the possibility of the optimisation of the composite material properties through the selection of the composite components i.e. matrix, metal fillers and functional additives. The assessment of composite matrix and fillers on physical, mechanical, tribological and thermal properties of the composite were performed. Tribological tests were performed using block-on-ring testing machine with friction pair imitating the slide bearing.

Jolanta DRABIK*, Ewa PAWELEC*, Janusz JANECKI*

CHARAKTERYSTYKA BIODEGRADOWALNYCH BAZ OLEJOWYCH EKOLOGICZNYCH SMARÓW PLASTYCZNYCH

CHARACTERISTIC OF THE BIODEGRADABLE BASE OILS OF ECOLOGICAL GREASES

Słowa kluczowa

Nietoksyczne i biodegradowalne bazy olejowe, oleje roślinne, stabilność oksydacyjna, charakterystyka lepkościowo-temperaturowa, odporność na zużycie, współczynnik tarcia.

Key-words

Non-toxic and biodegradable base oil, vegetable oils, stability oxidative, wear resistance, friction coefficient.

Streszczenie

Bazy olejowe stanowią główny komponent różnego rodzaju środków smarowych, w tym również nietoksycznych oraz podatnych na rozkład biologiczny smarów plastycznych. Przedmiotem badań były oleje roślinne (ra-

* Instytut Technologii Eksploatacji w radomiu, ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, tel. (048) 36-442-41.

finowany i surowy olej rzepakowy i słonecznikowy) jak również olej biały parafinowy. W artykule zaprezentowano charakterystykę lepkościowo-temperaturową wybranych olejów oraz stabilność oksydacyjną wyznaczoną na podstawie skaningowej analizy różnicowej (metoda DSC). Oceniono podatność olejów na rozkład biologiczny wyznaczając stopień biodegradacji. Ponadto przedstawiono wyniki badań dotyczące właściwości smarowanych badanych olejów wybranych do stosowania jako potencjalne bazy olejowe nietoksycznych smarów plastycznych. W tym celu przeprowadzono badania odporności olejów na przeciwwzużyciowe i przeciwwzatarciowe oddziaływania stosując standardowe testy tribologiczne, które rozszerzone zostały o badania w warunkach narastającego liniowo obciążenia (aparatury czterokulowy, tester T-02).

Na podstawie wyznaczonych parametrów oceniono możliwość użytkowania na nietoksycznych oraz biodegradowalnych bazach olejowych ekologicznego smaru plastycznego.

WPROWADZENIE

Zagadnienie nietoksyczności oraz biodegradacji środków smarowych stało się w ostatnich latach jednym z podstawowych problemów związanych z wymogami ochrony środowiska. Problem ten dotyczy zarówno cieczy bazowych jak również gotowych środków smarowych. Rosnące zanieczyszczenie środowiska naturalnego produktami odpadowymi, do których w znacznym stopniu zaliczyć należy przepracowane środki smarowe, przyczynił się do wzrostu zainteresowania produktami ekologicznie bezpiecznymi. Najważniejsze w tej sytuacji jest opracowanie środka smarowego, który po utracie właściwości eksploatacyjnych nie będzie stanowił dodatkowego obciążenia dla środowiska naturalnego. Istniejąca tendencja do maksymalnego ograniczenia emisji szkodliwych substancji do otoczenia wiąże się z koniecznością opracowywania produktów nietoksycznych i biodegradowalnych, co pociąga za sobą zmianę technologii produkcji środków smarowych [L. 1].

W związku z tym podjęto prace badawcze nad opracowaniem smarów plastycznych, które charakteryzują się odpowiednimi właściwościami smarnymi oraz są nietoksyczne i wykazują wysoki stopień podatności na biodegradację [L. 1, 2].

W pierwszej kolejności dokonano oceny baz olejowych przyjmując jako jedno z głównych kryteriów ich podatność na rozkład biologiczny

(Tab. 1). Uszeregowanie olejów bazowych ze względu zdolności do biodegradacji jest pomocnicze przy doborze fazy dyspergującej ekologicznych smarów plastycznych. Biorąc to pod uwagę oceniono możliwość stosowania jako baza olejowa nietoksycznych smarów plastycznych biodegradowalne oleje z grupy olejów roślinnych oraz potencjalnie biodegradowalne oleje z grupy olejów białych.

Wybrane oleje roślinne należą do różnych grup olejowych zawierających w przewodzie określone kwasy tłuszczowe. Do grupy kwasu erukowego zaliczany jest olej rzepakowy – Rz natomiast olej słonecznikowy – SŁ do grupy oleinowo-linolowej. Przynależność olejów roślinnych do poszczególnych grup olejowych związana jest ze zróżnicowaniem właściwości fizykochemicznych jak również z możliwością różnorodnych zastosowań [L. 1]. Zaletą wybranych olejów roślinnych są bardzo dobre właściwości smarne oraz lepkościowo-temperaturowe. Niekorzystnymi cechami jest niska odporność na proces utleniania oraz zdolność do hydrolizy [L. 3]. Obecność wielokrotnych wiązań nienasyconych powoduje brak stabilności oksydacyjnej olejów roślinnych zaś zawartość grupy estrowej i wolnych kwasów tłuszczowych sprzyja procesowi hydrolizy. Jednak wysoki stopień biodegradacji oraz nietoksyczność a także korzystne właściwości smarne zdecydowały o możliwości zastosowania tych właśnie olejów jako faza dyspergująca smaru plastycznego.

Tabela 1. Podatność niektórych cieczy bazowych na rozkład biologiczny wg [L. 2] testu CEC

Table 1. Comparison of biodegradability dispersion phase - test CEC

Rodzaj fazy dyspersyjnej	Stopień biodegradacji [%]	Kategoria podatności na rozkład biologiczny
Oleje roślinne	90–100	szybko biodegradowalne
Oleje mineralne	20–35	potencjalnie biodegradowalne
Oleje białe	25–45	potencjalnie biodegradowalne
Poliole i diestry	55–100	w zależności od rodzaju związku – szybko bądź potencjalnie biodegradowalne
Polietyry	0–25	nie biodegradowalne

W zależności od stopnia czystości wyróżniamy trzy rodzaje olejów białych a mianowicie oleje farmaceutyczne, oleje białe do kontaktu z żywnością oraz oleje białe techniczne dopuszczone do incydentalnego kontak-

tu z żywnością. W rezultacie głębokiej rafinacji ropy naftowej i procesów oczyszczających powstają oleje nie zawierające węglowodorów aromatycznych a w ich skład wchodzi jedynie węglowodory parafinowe i naftenowe. Wszystkie one spełniają wymagania farmakopei polskiej. Z grupy mineralnych olejów białych do badań wybrano olej parafinowy o czystości farmaceutycznej.

Wybór oleju bazowego stanowiącego znaczący udział w strukturze smaru jest bardzo ważny i umożliwia już w pierwszej fazie doboru składników sterowanie właściwościami eksploatacyjnymi smarów plastycznych. Z tego względu przeanalizowano również właściwości fizykochemiczne potencjalnych faz dyspergujących (**Tab. 2**).

Tabela 2. Podstawowe właściwości olejów roślinnych oraz białych olejów mineralnych [L. 1]
Table 2. Properties vegetable oil and white mineral oil

Właściwości	Oleje białe	Oleje roślinne
Gęstość, w temp. 20°C [g/cm ³]	0,827±0,890	ok. 0,911±0,934
Wskaźnik lepkości	100÷170	100÷250
Temperatura krzepnięcia [°C]	-12÷ -20	0÷ -18
Rozpuszczalność w wodzie	nierozpuszczalne	nierozpuszczalne
Podatność na rozkład biologiczny [%]	do 45	70÷100
Odporność na utlenianie	dobra	słaba
Właściwości smarne	dobre	dobre

Właściwościami różnicującymi wybrane grupy olejów jest inna odporność na oksydację i zachowanie w niskich temperaturach. W tym względzie oleje białe wykazują przewagę nad olejami roślinnymi. Natomiast podatność na rozkład biologiczny jest cechą wyróżniającą oleje roślinne. Ponadto niewątpliwą zaletą wybranych olejów bazowych jest możliwość stosowania typowych zagęszczaczy używanych podczas otrzymywania smarów plastycznych.

METODYKA BADAŃ

Przedmiotem badań był następujące oleje: parafinowy (P), rzepakowy rafinowany (Rz-R), rzepakowy surowy (Rz-S), słonecznikowy rafinowany (Sł-R) i surowy (Sł-S). Wytypowane oleje poddano serii badań przewi-

dzianych normami przedmiotowymi dla składników stanowiących fazę dyspergującą smarów plastycznych. Z zakresu badań fizykochemicznych oceniono właściwości reologiczne, temperaturę krzepnięcia oraz temperaturę zapłonu, a także podstawowe właściwości smarne dotyczące standardowych parametrów przeciwwzartarciovych i przeciwzużyciovych.

Właściwości smarne oceniono z zastosowaniem czterokulowego skojarzenia trącego, według znormalizowanej procedury badawczej określonej w normie PN-76/C-04147, wyznaczając wartość obciążenia zespawania (P_z) i graniczne obciążenie zużycia ($G_{oz/40}$).

Na podstawie granicznego obciążenia zużycia oceniono przeciwzużyciowe właściwości olejów, zaś poprzez pomiar obciążenia zespawania wyznaczono odporność baz olejovych na przeciwwzartarciove oddziaływania.

W celu dokonania kompleksowej oceny właściwości przeciwzużyciovych i przeciwwzartarciovych wybrane oleje bazove poddano również testowi w warunkach liniowego wzrostu obciążenia węzła tarcia [L. 1]. Badania wykonano przy zachowaniu następujących warunków pomiaru: obciążenie początkowe 0 N, prędkość narastania obciążenia 409 N/s, prędkość obrotowa wrzeciona 500 obr/min. Na podstawie przeprowadzonych testów wyznaczono wartość obciążenia zacierającego (P_t) i obciążenia powodującego zatarcie węzła tarcia (P_{oz}). Po zakończeniu testu zdemontowano węzeł tarcia i z wykorzystaniem mikroskopu optycznego oceniono wielkość średnicy śladu zużycia powstałą na trzech nieruchomych kulach testowego skojarzenia tribologicznego. Na podstawie uzyskanych wartości, granicznego obciążenia zatarcia i średnicy śladu zużycia, obliczono graniczny nacisk zatarcia (p_{oz}) określający skuteczność działania środka smarowego w warunkach ekstremalnych wymuszeń [L. 5].

Do oceny odporności oleju na rozkład termoutleniający zastosowano metodę skaningowej analizy różnicowej DSC. Pomiaru termoanalityczne prowadzono metodą dynamiczną przy liniowym wzroście temperatury. Eksperymenty prowadzone w atmosferze powietrza wykazały, że egzotermiczny efekt cieplny rozkładu termoutleniającego jest wyraźny i umożliwia wyznaczenie charakterystycznych parametrów. Na podstawie uzyskanych termogramów wyznaczono między innymi temperaturę początku utleniania (T_{ON}) oraz ekstrapolowany czas początku utleniania (t_{ON}) każdej próbki.

Warunki pomiarów dla wszystkich kompozycji olejovych były jednakowe co umożliwiło porównanie wyznaczonych charakterystycznych wielkości. Przeprowadzone badania pozwoliły ocenić odporność oksydacyjną badanych faz dyspergujących.

WYNIKI BADAŃ

Przyjmując jako cechy charakterystyczne faz dyspersyjnych smarów plastycznych odporność na oksydację oraz stopień biodegradacji wybrano spośród dostępnych olejów roślinnych olej rzepakowy i słonecznikowy oraz olej biały parafinowy. W ocenie przydatności wybranych olejów jako środki smarowe wymagane są ich dobre właściwości lepkościowo-temperaturowe oraz smarne. Wybrane oleje poddano badaniom oceniającym podstawowe właściwości fizykochemiczne (**Tab. 3**).

Tabela 3. Właściwości wybranych olejów bazowych

Table 3. Properties some of the base oil

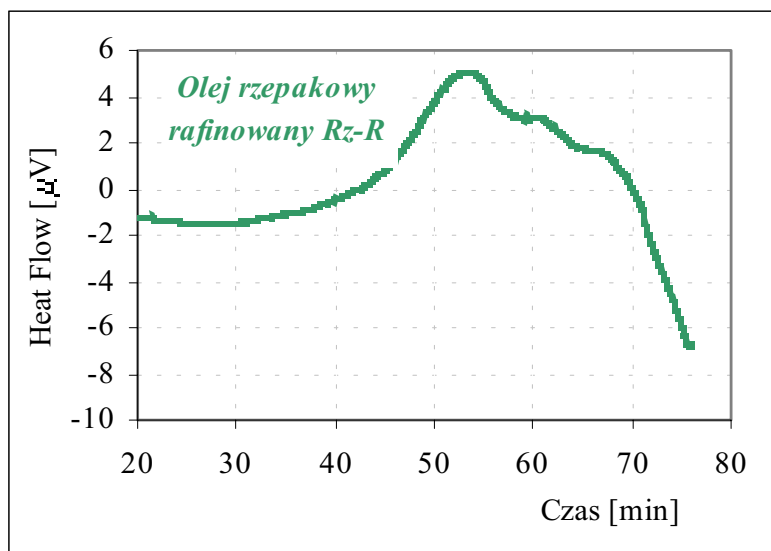
Wskaźnik	Metoda oceny	Olej mineralny	Olej roślinny			
		Parafinowy	Rzepakowy		Słonecznikowy	
			Rz-S	Rz-R	Sl-S	Sl-R
Gęstość [g/cm ³]	PN-90/C-04004	0,860	0,911	0,914	0,920	0,929
Temp. zapłonu [°C]	PN-92/C-04197	242	208	278	240	280
Lepkość kinematyczna [mm ² /s] w temp. 40°C w temp. 100°C	PN-81/C-04011	67,6 8,5	41,7 7,9	36,5 7,9	31,1 7,5	30,3 7,4
Wskaźnik lepkości	PN-79/C-04013	96	164	197	223	226
Temp. krzepnięcia [°C]	PN-55/C-04016	-11	-	-18	-	-11
Współczynnik załamania światła	PN-81/C-04952	1,4730	1,4712	1,4723	1,4736	1,4742
Obciążenie zespawania [N]	PN-76/C-04147	1236	1569	1569	1569	1569
Graniczne obciążenie zużycia [N/mm ²]	PN-76/C-04147	1113	1489	886	1283	1051

Lepkość olejów roślinnych zależy od długości łańcucha cząsteczki kwasu; dla wybranych olejów w temperaturze 40°C zmienia się ona w zakresie od 30 do 42 mm²/s. Natomiast wartość wskaźnika lepkości zawarta w zakresie od 160 do 230 świadczy o możliwości stosowania olejów roślinnych jako cieczy bazowe. Uzyskane wartości temperatury krzepnięcia zawarte są między -18°C a -11°C co zapewnia możliwość stosowania opracowanego smaru plastycznego na bazie oleju roślinnego, w zakresie niskich temperatur przy zachowaniu niezmiennych właściwości reologicz-

nych. Wszystkie te parametry zdecydowały o przydatności wybranych olejów roślinnych jako baza olejowa smaru plastycznego. Ponadto zaletą wybranych grup olejowych jest łatwość mieszania z olejami mineralnymi co powoduje, że oleje te mogą z powodzeniem stanowić ciecze bazowe smarów plastycznych zawierających ten sam rodzaj zagęszczacza [L. 1].

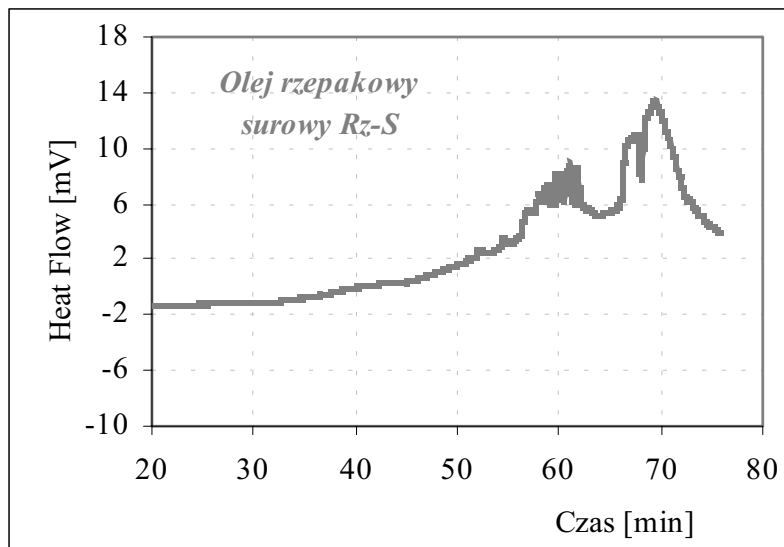
W przypadku wykorzystania oleju roślinnego jako baza olejowa ekologicznych smarów plastycznych proces autooksydacji stanowi istotny problem. Fakt ten zdecydował o podjęciu badań dotyczących zastosowania metod termooptycznych do oceny rozkładu termoutleniającego oleju. W zależności od rodzaju oleju oraz warunków ich użytkowania dobiera się odpowiednie normy, które w dość precyzyjny sposób pozwalają oznaczyć odporność na utlenianie przy uwzględnieniu jak największej liczby czynników, które mogą oddziaływać na olej podczas eksploatacji. Zapewnienie odpowiedniej do warunków użytkowania odporności na utlenianie to najważniejszy warunek przy wyborze metody oceny. Metody znormalizowane uwzględniają takie parametry jak temperatura, rodzaj czynnika utleniającego (tlen, powietrze), czas jego działania oraz obecność i rodzaj katalizatora [L. 6].

W badaniach stabilności oksydacyjnej olejów bazowych zastosowano metodę skaningowej analizy różnicowej [L. 7]. Na podstawie metody DSC oceniono odporność na rozkład termoutleniający olejów wyznaczając czas początku utleniania (Rys. 1–6).



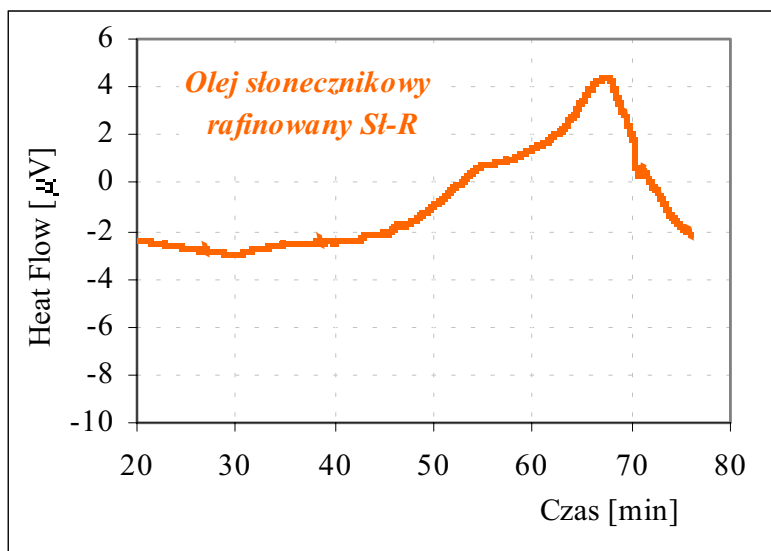
Rys. 1. Termogram DSC oleju rzepakowego rafinowanego

Fig. 1. DSC thermal of rapeseed oil



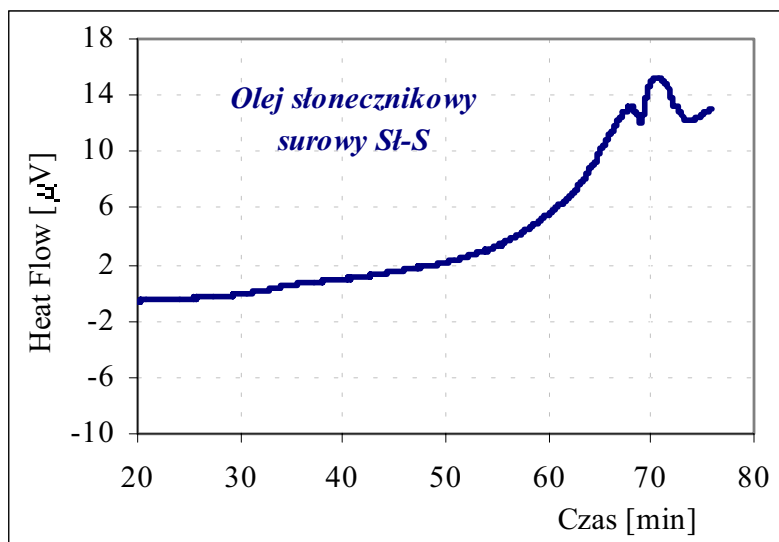
Rys. 2. Termogram DSC oleju rzepakowego surowego

Fig. 2. DSC thermal of rapeseed oil



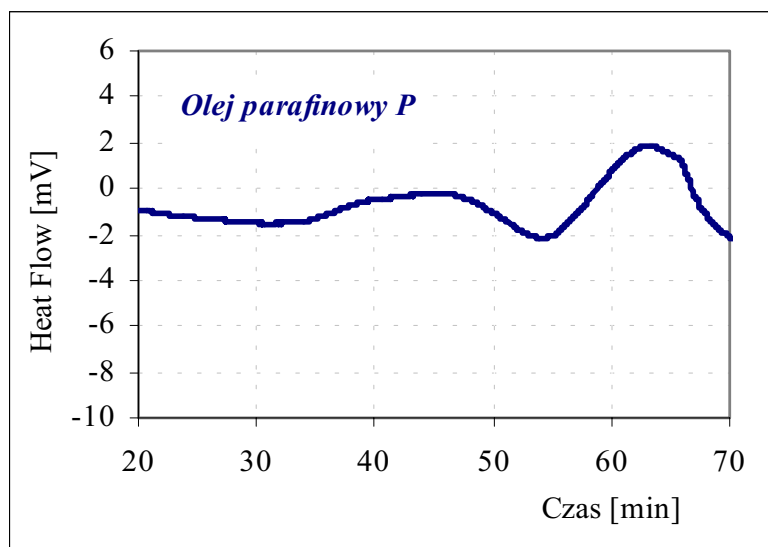
Rys. 3. Termogram DSC oleju słonecznikowego rafinowanego

Fig. 3. DSC thermal of sunflower oil



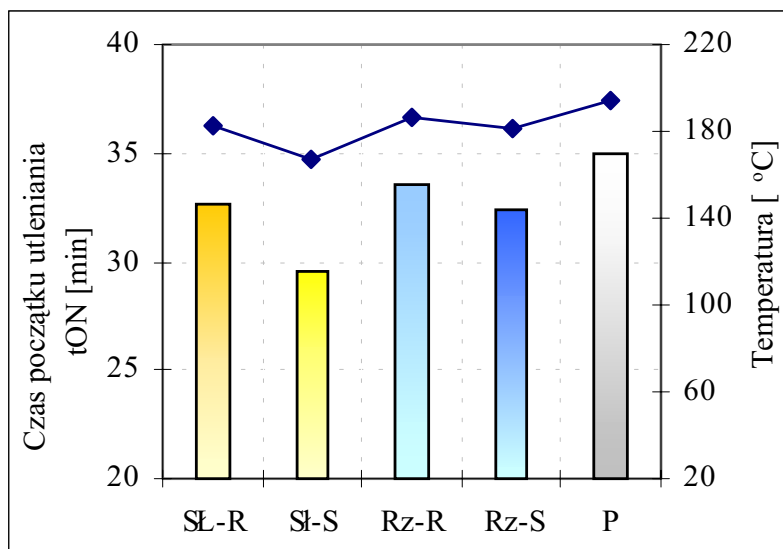
Rys. 4. Termogram DSC oleju słonecznikowego surowego

Fig. 4. DSC thermal of sunflower oil



Rys. 5. Termogram DSC oleju parafinowego

Fig. 5. DSC thermal of white oil



Rys. 6. Odporność oksydacyjna baz olejowych

Fig. 6. Oxidation stability of base oils

Przeprowadzone pomiary termoanalityczne wykazały, że metoda DSC jest szczególnie przydatna do oceny odporności na rozkład termoutleniającego danego oleju. Na podstawie uzyskanych rezultatów stwierdzono, że dla ustalonych warunków eksperymentu wyznaczone wartości czasów są charakterystyczne dla badanego oleju i mogą być wykorzystane do oznaczeń o charakterze przyspieszonego testu termooksydacyjnego zgodnie z zasadą; im dłuższy czas początku utleniania tym większa odporność oleju na utlenianie.

Olej parafinowy oraz oleje rafinowane wykazują wyższą odporność na utlenianie niż oleje roślinne surowe. W przypadku olejów roślinnych stwierdzono, że odporność na utlenianie zależy od struktury chemicznej a w szczególności od zawartości nienasyconych kwasów tłuszczowych – oleinowego, linolowego i linolenowego.

Ze względu na przeznaczenie opracowywanych środków smarowych do stosowania w wielu gałęziach przemysłu spożywczego i możliwość bezpośredniego kontaktu z żywnością stosowane bazy olejowe poddano ocenie toksykologicznej [L. 1, 5] oraz oceniono podatność na rozkład biologiczny (Tab. 4).

Tabela 4. Podatność na rozkład biologiczny baz olejowych wyznaczona na podstawie testu CEC-L-33T-82

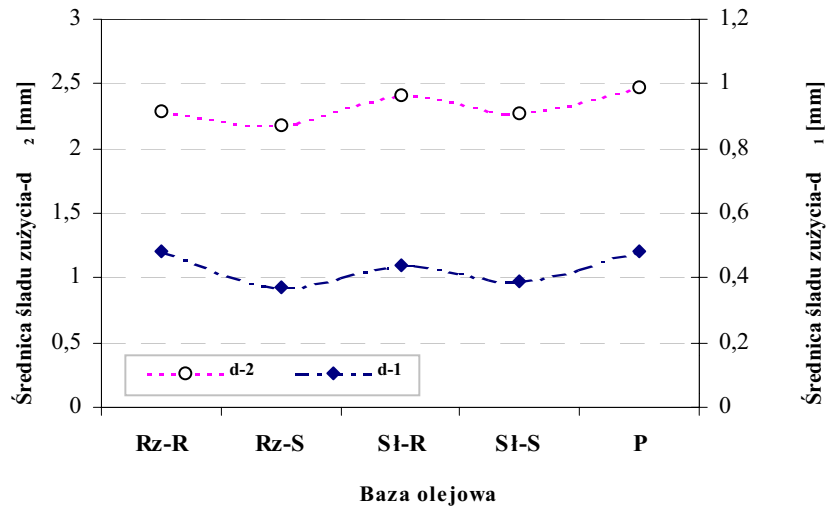
Table 4. Comparison of biodegradability dispersion phase - test CEC-L-33T-82

Rodzaj fazy dyspersyjnej	Podatność na rozkład biologiczny [%]	Kategoria podatności na rozkład biologiczny według trójstopniowej skali
Olej bazowy – naturalny		
Rzepakowy – RZ	94	łatwo biodegradowalny
Słonecznikowy – SŁ	97	łatwo biodegradowalny
Sojowy – SO	98	łatwo biodegradowalny
Olej bazowy – mineralny		
Parafinowy – P	40	umiarkowanie biodegradowalny

Według testu CEC przyjmuje się, że związek łatwo rozkładalny ulega biodegradacji powyżej 80%, a umiarkowanie podatny na rozkład 20-40% w ciągu 21 dni. Wyniki tych badań potwierdzają słuszność wyboru właśnie takich faz dyspersyjnych przy opracowywaniu ekologicznych smarów plastycznych.

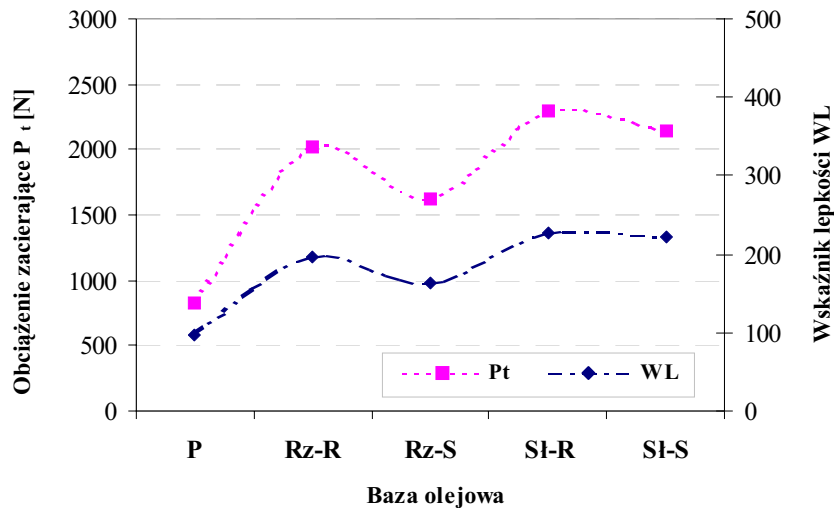
Wybraną grupę olejów poddano serii badań oceniających skuteczność wytworzonych z ich udziałem warstw smarowych do przeciwzużyciowej ochrony wężła tarcia. Badanie przeprowadzono zarówno w warunkach liniowego wzrostu obciążenia wężła tarcia, jak również po godzinnym teście pod obciążeniem 40kG. Na **Rys. 7** w formie graficznej przedstawiono zależność średnicy śladu zużycia w funkcji rodzaju bazy olejowej. Średnica oznaczona d_1 dotyczy zużycia wężła tarcia testowanego pod obciążeniem 40kG, zaś d_2 oznacza średnicę zużycia wyznaczoną dla wężła tarcia po teście pod liniowo narastającym obciążeniem.

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono wyższą skuteczność przeciwzużyciową nierafinowanych olejów roślinnych w porównaniu z olejami rafinowanymi. Zaobserwowana prawidłowość dotyczy zarówno wielkości średnic zużycia wężła tarcia po testach pod stałym obciążeniem (40 kG), jak również w warunkach intensywnych wymuszeń tribologicznych. Na podstawie uzyskanych wyników możemy uszeregować oleje pod względem skuteczności ochrony antyzużyciowej w następujący sposób: Rz-S>Sł-S>Sł-R>Rz-R>P.



Rys. 7. Zależność średnicy śladu zużycia węzła tarcia w funkcji rodzaju bazy olejowej
 Fig. 7. Anti-wear properties of the base oils after an hour's wear test executed according to the standard four-ball method and at the modified four-ball tester T-02

Po przeprowadzeniu badań w warunkach liniowego wzrostu obciążenia oceniono zdolność badanych olejów do tworzenia warstw granicznych (**Rys. 8**).



Rys. 8. Zależność obciążenia zacieraającego P_t i wskaźnika lepkości w funkcji rodzaju bazy olejowej

Fig. 8. Anti-seizure properties and viscosity index of the oil bases

Stwierdzono, że rafinowane oleje roślinne zapewniają trwalszy film smarowy w warunkach wysokich jednostkowych mocy tarcia niż oleje surowe. Warstwę graniczną o najniższej trwałości w warunkach zacierania tworzy olej parafinowy.

Wyższa odporność warstw smarowych na przeciwzużyciowe oddziaływanie, wyznaczona zarówno w warunkach stałego obciążenia węzła tarcia, jak i narastających obciążeń, jest realizowana z udziałem nierafinowanych olejów roślinnych. Należy przypuszczać, że osiągnięcie tego rezultatu jest związane z tworzeniem trwałych warstw protektorowych powstających z udziałem między innymi wolnych kwasów tłuszczowych, fosfatydów, steroli. Substancje te zostają w większości usunięte w wyniku rafinacji olejów roślinnych.

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania fizykochemiczne i tribologiczne pozwalają na stwierdzenie, że trwałość wytworzonych warstw granicznych, w warunkach zacierania, jest zależna od właściwości lepkościowo-temperaturowych olejów.

Zastosowana do oceny stabilności oksydacyjnej olejów różnicowa kalorymetria skaningowa DSC umożliwia rejestrację efektów cieplnych towarzyszących procesom zachodzącym pod wpływem temperatury. Na podstawie wartości wyznaczonych parametrów stwierdzono, że odporność oksydacyjna rafinowanych olejów roślinnych jest porównywalna z odpornością oleju parafinowego.

Wyniki prac badawczych pozwalają na uznanie metody DSC jako szybkiej metody oceny stabilności oksydacyjnej oleju w porównaniu do standardowych metod analitycznych.

LITERATURA

1. Drabik J., Pawelec E., Janecki J., Bajer J.: Sprawozdanie z prac badawczych: Badanie wpływu biodegradowalnych baz olejowych na właściwości smaru plastycznego. Instytut Technologii Eksploatacji Radom, 1998.
2. Drabik J., Pawelec E.: Effect of non-toxic components on tribological and ecological characteristics of the greases. COST - 516 Tribology Symposium, Antwerp - Belgium, 1999, s. 257-262.
3. Lal K. Carrick V.: Performance testing of lubricants on high oleic vegetable oils. *J. Synth. Lubr.* 1994, 11, 3, 189-206.

4. Kańska Z.: *Application of biodegradation tests methods in environmental biotechnology*. Department of Chemistry Warsaw University of Technology. Warsaw 1998.
5. Piekoszewski W., Szczerek M., Tuszyński W.: Method for scuffing propagation assessment. *Tribotest*. 2001, 7, s. 219–228.
6. Becker R., Knorr A.: Antioxidantien für pflanzliche Öle. *Tribologie + Schmierungstechnik*. 42 Jahrgang 5, 1995, 272–277.
7. Kowalski B.: Oxidative Stabilities of Engine Oils Contaminated by Vegetable oil. *Thermochimica Acta* 250, 1995, 55–63.

Recenzent:
Ryszard MARCZAK

Summary

The elaboration of new a generation lubricants with elimination or considerable reduction of contents of toxic chemical compounds has been the first stage of undertaken work. The achievement of this aim was possible thanks to use of the non-toxic oil basis, ecologically safe thickeners as well as modifiers improving useful properties.

The composition of non-toxic biodegradable greases is the same as of greases made on the base of mineral oils, namely the main components are as follows: base oils, safe thickeners and improvers. In the course of selecting these elements during elaboration of new generation greases their non-toxic, degree of purity and the biodegradation level are of the biggest importance.

Several oils have been tested using the Four –Ball Testing Machine and its modified version. Vegetable oils were oxidized in the cell of a differential scanning calorimeter (DSC). The characteristic parameters were read from DSC exotherm and then used to assessment of the oils oxidative stabilities.

in order to choose the proper procedures to the estimation of the non-toxicity grade and biodegradability of lubricants the analysis of the most important methods has been performed. According to chosen method the compliance to the biological decomposition of the dispersion phases have been estimated. These results confirmed the environment friendly character of the base oils that in employed obtained greases.

For this purpose an analysis of physicochemical and tribological properties of selected vegetable oils was carried out. From a point-view of the resistance to oxidation and a high biodegradability the refined and unrefined vegetable oils (rapeseed and sunflower) and white mineral oil from all the available natural oils we have chosen.

Good lubricating properties of vegetable oils and a high degree of their biodegradation were decisive for using them as the dispersion phase of lubricating greases.

Since vegetable oils are vulnerable to oxidation, in the future further work aiming at its improvement is necessary. This will be realised through a selection of the appropriate (non-toxic, white colour) antioxidants.

Eugene FELDSHTEIN*

MODELOWANIE FIZYCZNE PROCESÓW ZUŻYCIA NOŻY Z MATERIAŁÓW SUPERTWARDYCH

PHYSICAL MODELING OF WEAR PROCESS OF SUPERHARD MATERIAL CUTTERS

Słowa kluczowe:

modelowanie fizyczne, zużycie, materiał supertwardy, trwałość narzędzia

Key-words:

physical modeling, wear, superhard material, tool life

Streszczenie

Obecnie dla badań procesów tarcia są wykorzystywane testery różnych konstrukcji, symulujące warunki wzajemnych oddziaływań stykających się powierzchni elementów, poprzez wielokrotne powtarzanie styków tych samych powierzchni. Jednak w procesie skrawania zużywające się powierzchnie narzędzia w każdej chwili stykają się z co raz to nowymi powierzchniami elementu i wióra. W opracowanym przyrządzie próbka pod-

* Instytut Budowy Maszyn i Pojazdów, Uniwersytet Zielonogórski, ul. Podgórna, 50, 65-246 Zielona Góra

dawana tarcia wstępuje w kontakt z powierzchnią obrabianego elementu bezpośrednio po przejściu noża tokarskiego, przy czym cykl tarcia powtarza się po kolejnym przejściu noża. Poziom naprężeń normalnych na powierzchni styku próbki z elementem przyjmowano równym poziomowi normalnych naprężeń stykowych na powierzchni przyłożenia noża, powstających podczas skrawania i na podstawie tego określano wartość siły docisku. Ustalono, że wpływ prędkości skrawania i własności materiału próbki (noża) na przebieg procesu zużycia najbardziej przejawia się w zakresie prędkości 20–40 m/min i powyżej 100 m/min. Zmiany intensywności zużycia w miarę wzrostu prędkości skrawania są dość podobne do zmian okresów trwałości noża przy toczeniu. Intensywność zużycia wzrasta w miarę wzrostu wartości siły normalnej. W zależności od poziomu prędkości tarcia przewagę mają różne rodzaje zużycia. Przy małych prędkościach tarcia zachodzi zużycie ściernie. W zakresie prędkości 20–40 m/min zachodzi kruche wykruszenie z powierzchni tarcia cząstek o dość dużych wymiarach, przy tym intensywność wykruszania kompozytu 01 jest znacznie większa w porównaniu z kompozytem 10. W całym badanym zakresie prędkości skrawania procesowi tarcia towarzyszą zjawiska szepiania, tj. oddziaływania adhezyjne. Najlepsze warunki do zużycia adhezyjnego odpowiadają prędkościom tarcia 80–120 m/min. Przy wysokich prędkościach tarcia na powierzchniach tarcia powstają mikropełknięcia, prawdopodobnie, z powodu ich przegrzania, i intensywność zużycia szybko wzrasta. Analogiczny charakter zużycia powierzchni przyłożenia noża obserwuje się podczas toczenia materiału spiekanego.

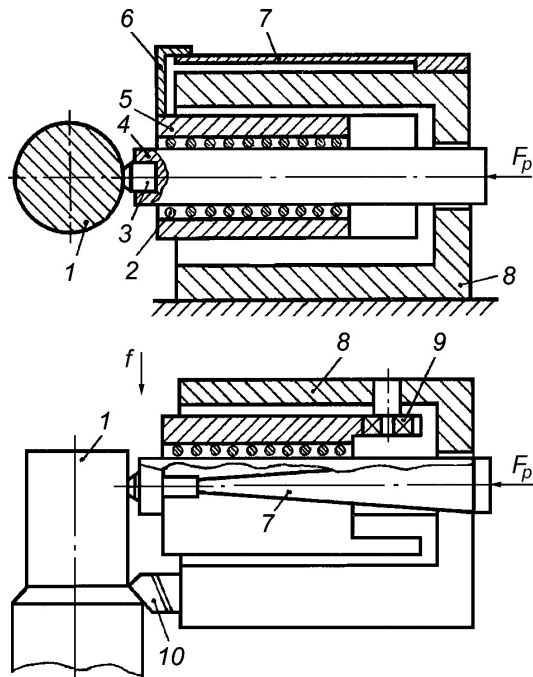
WPROWADZENIE

Obecnie w celu analizy prawidłowości przebiegu procesów fizycznych w strefie skrawania w szerokim zakresie wykorzystywane są różne metody modelowania fizycznego i matematycznego. Modelowanie pomaga ustalić skomplikowany wpływ kompleksu czynników fizycznych, chemicznych, mechanicznych i geometrycznych na procesy zachodzące w strefie skrawania. Modelowanie fizyczne dość skutecznie wykorzystywano w praktyce badawczej, lecz w niektórych przypadkach mogą występować błędy związane z nieprawidłowym wyborem warunków wzajemnych oddziaływań stykających się powierzchni i obciążeniem powierzchni styku. Istnieją różne metody badań procesów tarcia [L. 1]. Najczęściej są wykorzystywane testery tarcia różnych konstrukcji, imitujące warunki wzajemnych

oddziaływań stykających się powierzchni elementów, czyli wielokrotnie powtarzanie styków tych samych powierzchni. Jednak w procesie skrawania zużywające się powierzchni narzędzia w każdej chwili kontaktują się z co raz to nowymi powierzchniami elementu i wióra. Na tych powierzchniach brak warstw adsorbowanych, utlenionych itp., i intensywność zużycia jest inna niż w typowych warunkach tarcia.

PRZYRZĄD DO MODELOWANIA

W celu maksymalnego zbliżenia warunków zużycia przy skrawaniu i tarcii opracowano przyrząd (**Rysunek 1**), w którym próbka poddawana tarcii wstępuje w kontakt z powierzchnią obrabianego elementu bezpośrednio po przejściu noża tokarskiego, przy czym cykl tarcia powtarza się po kolejnym przejściu noża.



Rys. 1. Schemat przyrządu do modelowania procesów tarcia i zużycia noże

Fig. 1. The scheme of the device for modeling of friction and cutter's wear process

Przyrząd działa w sposób następujący. Próbka 3 wykonana z badanego materiału narzędziowego zamocowana jest w trzpieniu 4 mającym moż-

liwość osiowego przemieszczania się w prowadnicach tocnych 2względem łoża 5. Łoże umiejscowiono w korpusie 8 w łożyskach tocnych samonastawnych 9. Łoże to poprzez wspornik 6 opiera się o belkę tensometryczną 7 mającą kształt trapezu. Na trzpień 4 działa siła F_p , której wartość wynika z niezbędności osiągnięcia na powierzchni styku próbki naprężeń elementem stałego poziomu naprężeń normalnych, równych normalnym naprężeniom stykowym na powierzchni przyłożenia noża powstającym podczas skrawania. Pod wpływem siły F_p próbka dociskana jest do powierzchni elementu 1, wskutek czego powstaje siła tarcia wpływająca na belkę tensometryczną 7 poprzez łożę 5 i wspornik 6. Sygnał z czujników tensometrycznych wzmocniony jest poprzez wzmacniacz tensometryczny i rejestrowany przy pomocy oscylografu. W celu zbliżenia warunków tarcia i zużycia próbki do warunków procesu skrawania bezpośrednio przed próbką 1 ustawiono nóż tokarski 10 skrawający określoną warstwę materiału. Tworzy się wówczas powierzchnia tarcia, której właściwości są analogiczne do właściwości powierzchni styku noża z elementem obrabianym.

METODYKA OBLICZEŃ SIŁY DOCISKU

Powyżej mówiono, że poziom naprężeń normalnych na powierzchni styku próbki z elementem musi być równym poziomowi normalnych naprężeń stykowych na powierzchni przyłożenia noża, powstających podczas skrawania. Uwzględniono przy tym, że oddziałują między sobą nie idealnie gładkie, lecz chropowate powierzchnie, tj. w styku znajduje się nie cała powierzchnia próbki, lecz tylko występy jej mikronierówności. W miarę zwiększenia obciążenia w styku uczestniczy co raz większa ilość występów, które odkształcają się na początku sprężystość a następnie sprężysto-plastycznie. Przy tym rzeczywista powierzchnia styku jest znacznie mniejsza od nominalnej, podczas, gdy ciśnienie rzeczywiste jest odpowiednio większe w porównaniu z nominalnym. Wartość siły normalnej niezbędnej do modelowania procesu zużycia można obliczyć wg [L. 2].

W warunkach styku powierzchni chropowatych średnie rzeczywiste ciśnienie na powierzchni styku jest równe

$$p_r = (KB)^{\frac{v}{v+\omega}} \left(\frac{Rp}{r} \right)^{\frac{v\omega}{v+\omega}} \left(\frac{F_p}{\alpha PmrA_c} \right)^{\frac{\omega}{1+v}},$$

gdzie K , B , ω – współczynniki charakteryzujące plastyczne własności stykających się materiałów, Pmr – udział materiałowy profilu zmierzony na linii średniej, R_p – wysokość najwyższego wzniesienia profilu, F_p – obciążenie normalne, α – współczynnik uwzględniający warunki deformacji sprężystej.

Współczynniki α , ω i K dobrane wg tabeli [L. 2], B – obliczono wg wzoru

$$B = \frac{0,43}{\frac{(1-\mu_1^2)}{E_1} + \frac{(1-\mu_2^2)}{E_2}},$$

gdzie E_1 , E_2 – moduły sprężystości stykających się materiałów, μ_1 , μ_2 – współczynniki Poissona tych materiałów.

Parametr uzupełniający udział nośny profili można obliczyć wg wzoru

$$v = 2Pmr \cdot \frac{R_p}{Ra} - 1Ra - \text{średnia arytmetyczna rzędnych profilu.}$$

Zredukowany promień krzywizny wzniesień profilu

$$r = \sqrt{r_p r_{wz}},$$

gdzie r_p i r_{wz} – średnie wartości promieni krzywizny wzniesień zmierzone w kierunkach poprzecznym i wzdłużnym.

Wartości r , r_p , r_w i n otrzymano na podstawie analizy profilogramów powierzchni. Wyniki obliczeń dość dobrze odpowiadają danym [L. 2–4]. Wykorzystanie do obliczeń obwodowego przekroju styku A pozwala uwzględnić wpływ falistości powierzchni na warunki styku. Wartość A jest równa

$$A = 2,83 \sqrt{n_w (\Theta_\Sigma R_w F_p)^2},$$

gdzie n_w – ilość fal w zakresie powierzchni styku, R_w – zredukowany promień fali.

W przypadku styku powierzchni falistej (po toczeniu) z powierzchnią gładką (powierzchnia próbki z materiału supertwardego) można przyjąć $R_w = R_{w1}$.

Na podstawie wyżej przedstawionych wzorów i przyjmując, że rzeczywiste ciśnienie na powierzchni styku p_r jest równe normalnemu naprężeniu na powierzchni przyłożenia noża σ_a , można otrzymać wzór do obliczeń normalnej siły wpływającej na próbkę:

$$F_p = 22n_f (\alpha Pmr)^3 (\Theta_\Sigma R_f)^2 \sigma_p^{\frac{\omega+v}{\omega}} \left(\frac{r}{R_p} \right)^v \left(KB^{\frac{v}{\omega}} \right)$$

Wpływ warunków toczenia na wartość σ_a omówiono w [L. 5].

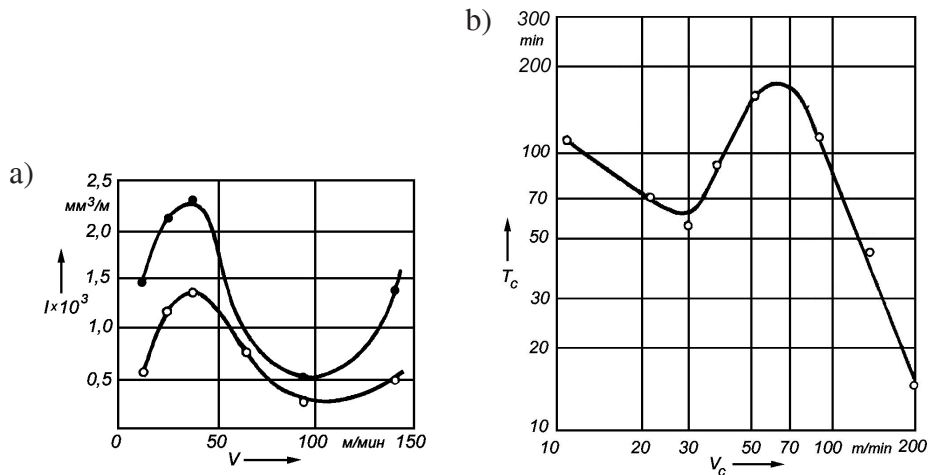
Analizę procesów zużycia noży dokonano na przykładzie modelowania fizycznego par trących składających się z jednej strony z materiału wyprodukowanego na bazie proszku żelaza, a z drugiej – materiałów supertwardych. Materiał proszkowy zawierał 0,20%C + 9%Cr, pozostałe – żelazo. Materiał ten w wyniku obróbki cieplno-chemicznej (nawęglanie) miał twardość 55–57 HRC i porowatość końcową 4–6%. Toczenie wykonano nożem z twardego azotku boru o strukturze wurcytowej (kompozyt 10). Do badań porównawczych wykorzystano nóż z azotku boru o strukturze regularnej (kompozyt 01). Z tych samych materiałów wykonano próbki do modelowania fizycznego. Powierzchni tarcia próbek szlifowano ściernicą diamentową a następnie docierano pastą diamentową na parametrach analogicznych do ostrzenia noży. Współczynnik Poissona przyjęto zbliżony do jego wartości dla diamentu [L. 6], tj. $\mu \sim 0,07$ [L. 7]. Intensywność względnego zużycia objętościowego obliczono wg wzoru

$$I = \frac{m - m_0}{\rho V \tau},$$

gdzie m i m_0 – masy nowej i zużytej próbki, ρ – gęstość badanego materiału, V – prędkość tarcia, τ – czas tarcia.

Badania prawidłowości tarcia próbek z materiałów supertwardych wykazały znaczny wpływ prędkości skrawania i własności materiału próbki (noża) na przebieg procesu zużycia (**Rysunek 2a**). Wpływ ten najbardziej przejawia się w zakresie prędkości 20–40 m/min i powyżej 100 m/min. Zmiany intensywności zużycia w miarę wzrostu prędkości skrawania są dość podobne do zmian okresów trwałości noży przy toczeniu (**Rysunek 2b**).

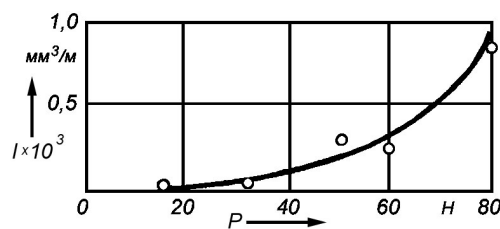
Intensywność zużycia wzrasta w miarę wzrostu wartości siły normalnej (**Rysunek 3**) w wyniku zwiększenia ilości obszarów szepiania wierzchołków wzniesień powierzchni trących, tj. oddziaływań adhezyjnych [L. 8].



Rys 2. Zależność intensywności względnego zużycia objętościowego (a) i trwałości noża (b) od prędkości wzajemnego ruchu ciał trących

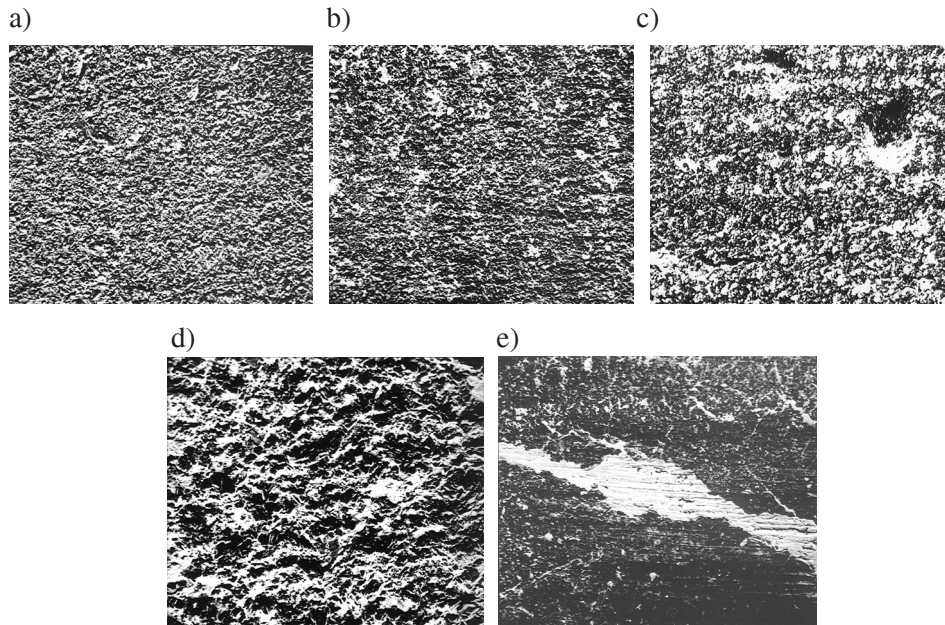
Fig. 2. Dependences of relative intensity of wear process (a) and cutter life (b) on speed of rubbed elements mutual moving

W celu ustalania przyczyn zmian w intensywności zużycia powierzchni tarcia analizowano na mikroskopie skaningowym MSM-2 oraz na mikroanalizatorze rentgenowskim MS-46. Analiza elektrono-mikroskopijna powierzchni kontaktowych próbek wykonanych z kompozytów 10 i 01 (**Rysunek 4**) wykazała, że w zależności od poziomu prędkości tarcia przewagę mają różne rodzaje zużycia. Przy małych prędkościach tarcia zachodzi zużycie ściernie. W zakresie prędkości 20–40 m/min zachodzi kruche wykruszenie z powierzchni tarcia cząstek o dość dużych wymiarach, przy tym intensywność wykruszania kompozytu 01 jest znacznie większa w porównaniu z kompozytem 10 (**Rysunki 4, 5**). Jest to spowodowane zmianami warunków skrawania w danym zakresie prędkości z powodu wpływu porów znajdujących się w materiale obrabianym.



Rys. 3. Zależność intensywności względnego zużycia objętościowego od wartości obciążenia

Fig. 3. Influence of force on relative intensity of elements wear

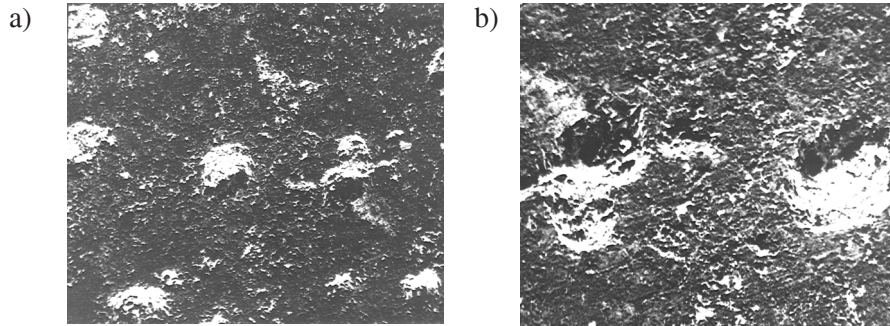


Rys. 4. Powierzchni próbek z kompozytu 10: a – nowa powierzchnia; b – powierzchnia po zużyciu z prędkością $V = 10$ m/min; c – $V = 30$ m/min; d – $V = 65$ m/min; e – $V = 200$ m/min

Fig. 4. Surfaces of elements from composite 10: a – a new surface; b – a surface after wear with speed $V = 10$ m/min; c – $V = 30$ m/min; d – $V = 65$ m/min; e – $V = 200$ m/min

Przeprowadzone obliczenia wskazują, że porowatość końcowa w znacznym stopniu wpływa na charakter drgań w strefie skrawania. Może ona powodować zwiększenie amplitudy drgań 5–10 razy w porównaniu ze skrawaniem stali jednolitych, gdyż wówczas częstotliwość drgań oprawki równa jest częstotliwości zderzeń krawędzi ostrza skrawającego z obrzeżami por, wobec czego w zakresie prędkości toczenia 25–38 m/min powstaje rezonans [L. 9]. Drgania o dużych amplitudach powodują mechaniczne wykruszenia cząstek kompozytów z powierzchni trących. Dla kompozytu 01 wykruszenia są większe, ponieważ przedziały jego wytrzymałość na zginanie i na ściskanie są 1,2–1,25 razy mniejsze w porównaniu z kompozytem 10.

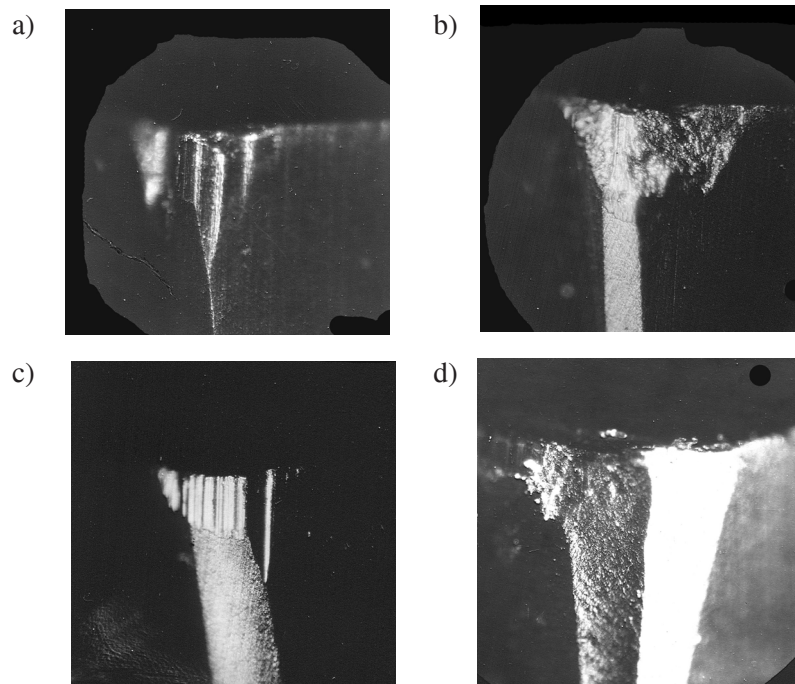
W całym badanym zakresie prędkości skrawania procesowi tarcia towarzyszą zjawiska szepiania, tj. oddziaływania adhezyjne. Najlepsze warunki dla zużycia adhezyjnego odpowiadają prędkościom tarcia 80–120 m/min. Przy wysokich prędkościach tarcia na powierzchniach tarcia powstają mikropęknięcia, prawdopodobnie, z powodu ich przegrzania, i intensywność zużycia



Rys. 5. Powierzchni próbek z kompozytu 01 po zużyciu z prędkością 30 m/min:
a) – $\times 100$; b) – $\times 200$

Fig. 5. Surfaces of elements from composite 01 after wear with speed 30 m/mines:
a) – $\times 100$; b) – $\times 200$

szybko wzrasta. Analogiczny charakter zużycia powierzchni przyłożenia noży obserwuje się podczas toczenia materiału spiekanego (**Rysunek 6**).



Rys. 6. Charakter zużycia noże z kompozytu 10 przy toczeniu materiału spiekanego:
a) – $V = 11$ m/min; b) – $V = 30$ m/min; c) – $V = 52$ m/min; d) – $V = 200$ m/min

Fig. 6. Character of wear of cutters from composite 10 after turning of sintered material:
a) – $V = 11$ m/mines; b) – $V = 30$ m/mines; c) – $V = 52$ m/mines; d) – $V = 200$ m/mines

Analiza mikrorengeospektralna cząstek, znajdujących się na powierzchniach zużycia próbek, wykazała zmniejszenie całkowitej ilości cząstek oraz zmianę ich składu chemicznego przy dużych prędkościach skrawania. W tych warunkach zaobserwowano niektóre zwiększenie zawartości chromu. Chrom, w odróżnieniu od żelaza, jest materiałem aktywnym adhezyjne względem azotku boru [L. 10], przy czym wzajemne oddziaływania między nimi są możliwe przy temperaturach powyżej 700°C [L. 11]. Taka temperatura powstaje podczas skrawania z dużymi prędkościami [L. 9], inicjalizując adsorbowanie atomów chromu na powierzchniach tarcia. Jednocześnie zwiększa się szybkość powstawania warstewek tlenków boru, działających jako smar twardy, przeszkadzających szepianiu się powierzchni trących i zmniejszających ilość przylepionych cząstek.

WNIOSKI

Modelowanie fizyczne procesów tarcia i zużycia zachodzących podczas skrawania pozwalają dość dokładne prognozować możliwe zmiany w trwałości narzędzi skrawających. W warunkach toczenia materiałów na bazie proszku żelaza nożami z materiałów supertwardych powstają zużycie ściernie i adhezyjne, którym w poszczególnych zakresach prędkości tarcia (skrawania) towarzyszy kruche wykruszenie cząstek materiału narzędzia oraz pęknięcie powierzchni trącej. Jest to spowodowane specyfiką kontaktu ostrza z powierzchnią porowatą oraz przegrzania powierzchni trących przy dużych prędkościach skrawania.

LITERATURA

1. Прушак В.Я. Методы испытаний материалов на трение и износ. Вышэйшая школа, Минск, 1999.
2. Трение, изнашивание и смазка /Под ред. В.В.Крагельского, В.В. Алисина. Т. 1. Машиностроение, Москва, 1978.
3. Комбалов В.С. Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ. Наука, Москва, 1974.
4. Рыжов Э.В. Контактная жесткость деталей машин. Машиностроение, Москва, 1966.
5. Feldshtein E. Contact forces and tensions while finish turning of hardened iron based porous materials// W: Industry. Technology. Enviroment – ITE' 2002: Confrence Proceedings. MGGU „Stankin”, Moskwa, 2002. – T. 2, 602–606.

6. Хирт Д, Лоте И. Теория дислокаций. Атомиздат, Москва, 1972.
7. De Vries R.C. Cubic boron nitride: hand book of properties. General Electric. Reprint N 72CDR178.
8. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. Машиностроение, Москва, 1976.
9. Feldsztein E. Skrawalność konstrukcyjnych materiałów porowatych oraz powłok ochronnych na bazie proszku żelaza. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, Vol. 20, Nr 2, 2000, 31–39.
10. Найдич Ю.В., Колесниченко Г.А., Друй М.С и др. Закономерности растекания металлических расплавов по поверхности нитрида бора. Элементы, адгезионно-активные к нитриду бора. Физика и химия обработки материалов, № 1, 1971, 51–54.
11. Бондаренко В.П., Халепа А.П. Термодинамическое исследование взаимодействия нитрида бора с переходными металлами. Синтетические алмазы, № 2, 1971, 7–8.

Recenzent:
Marian SZCZEREK

Summary

Now processes of friction, as a rule, are researched using machines of friction simulating conditions of machine details surfaces interaction (multiple repetitions of contact of the same surfaces). While cutting, however, tool surfaces each moment of time are contacting with new and new surfaces of a detail and a chip. In the developed device the rubbed element comes to contact with the processed surface directly after a cutter.

The device works as follows. The element 1 made out from a researched tool material was fixed on a pivot 2 which have a possibility of axial moving on roll guides 3 in a holder 4. It is locked in the case of the device 5 in self-installed ball bearings 6 and bases on tensometric trapezoidal beam 8 using a corbel 7. Force F_p is put to a pivot 2. Under action of this force the element is pressed to the surface of detail 9, therefore the force of friction arises affecting through holder 4 and corbel 7 on tensometric beam 8. The signal from tensometric sensors is fixed by a tensometric amplifier and an oscillograph. To approach conditions of friction and wear process of an element to conditions of process of cutting, directly in front of an element 1 the cutter 10 is installed which removes a layer of metal, equal to depth of cutting. Thus the surface is formed which characteristics are similar to characteristics of a contact surface of a major flank of a cutter with a detail.

Normal pressure on contact surface was accepted equal to a normal tension on a major flank of the cutter, and normal force on a rubbed element was calculated. It was taken into account, that contacting surfaces are not absolutely smooth, but rough. The actual area of contact between roughness surfaces is too less of nominal and actual pressure exceeds nominal pressure essentially. Processes of friction were researched for the rubbed pairs consisting on the one hand from a material, produced on the base of a powder iron, and on another hand – from superhard materials. The sintered material contains 0,20%C, 9%Cr, the rest - iron, its residual porosity is equal 4 – 6%. Further it was cemented to provide hardness 55 – 57 HRC. Turning was performed by cutters from a composite 10 with structure similar to vircite, and the composite 01 with cubic structure was used for comparative researches.

Influence of cutting speed and properties of a tool material on wear process shows itself mostly in a range of speeds 20...40 m/mines and over 100 m/mines. Changes of rubbed elements wear process intensity while speed of cutting grows closely corresponds to changes of cutters life while turning. Intensity of wear process grows according to normal force growing.

Depending on a level of friction speeds various mechanisms of wear process of contact surfaces dominate. For small speeds of friction abrasive wear process is observed. In a range of speeds 20 – 40 m/mines large particles breaking off on friction surfaces of significant is observed, and intensity of composite 01 breaking off is much greater than a composite 10. In all investigated range of speeds process of friction is accompanied by adhesive interaction. Its optimum conditions are observed at speeds 80 – 120 m/mines. At high speeds of cutting on surfaces of friction there are microcracks, probably as a result of their localized overheating and wear process is sharply intensified. Such character of contact surfaces wear is similar to character of wear of major flanks of cutters. Physical modeling of friction and the wear process, which take place while cutting, allows forecasting changes in life of cutting tools just precisely.

**Jadwiga JANOWSKA*, Zenobia RŻANEK-BOROCH*,
Magdalena EKWIŃSKA***

**ZASTOSOWANIE MIKROSKOPU SIŁ ATOMOWYCH
DO BADANIA WŁASNOŚCI TARCIOWYCH
ULTRACIENKICH POWŁOK**

**APPLICATION OF ATOMIC FORCE MICROSCOPE TO
STUDY FRICTIONAL PROPERTIES OF ULTRATHIN FILMS**

Słowa kluczowe

Mikroskop sił atomowych, topografia powierzchni, powłoki wytwarzane techniką elektroplazmową

Keywords

Atomic force microscope, topography, films deposited by electroplasma technique

Streszczenie

W referacie przedstawiono zastosowanie mikroskopu sił atomowych do zbadania własności tarciowych ultracienkich powłok wytworzonych tech-

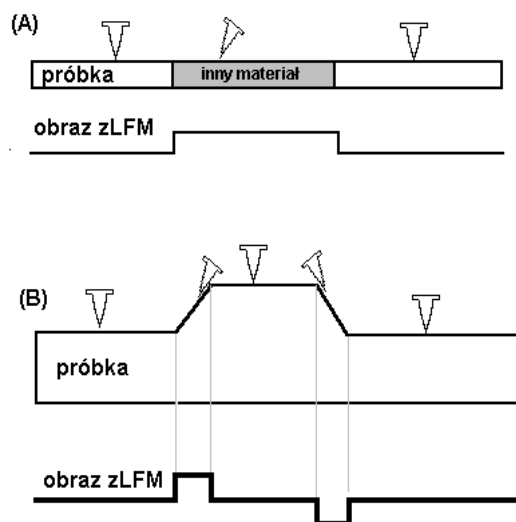
* Warsaw University of Technology, Institute of Micromechanics and Photonics, ul. Św. Andrzeja Boboli 8, 02-525 Warszawa, Poland Tel. +48(22) 660-8287, Fax 660-86-01

niką elektroplazmową oraz wpływu prowadzenia procesu osadzania warstw (zmiana temperatury podłoża) na własności uzyskanych powłok.

WSTĘP

Mikroskopy sił atomowych AFM stosowane są do badania własności powierzchni materiałów w skali nanometrycznej [L. 1]. Używane są głównie do obrazowania topografii badanej powierzchni. Mikroskop sił atomowych z opcją pomiaru siły poprzecznej, znajdujący się w Laboratorium Mikrotribologii Instytutu Mikromechaniki i Fotoniki Politechniki Warszawskiej, pozwala nie tylko na tworzenie trójwymiarowych obrazów topografii badanej próbki, poprzez pomiar siły normalnej, ale również na wyznaczenie siły tarcia, którą w mikroskali wyraża składowa siły poprzecznej.

Na skutek siły poprzecznej (siły tarcia), powstałej między igłą mikroskopu sił atomowych a badaną warstwą podczas ruchu ostrza nad próbką w trakcie skanowania powierzchni, następuje skrzywienie cantilevera. Skrzywienie belki pomiarowej może być wywołane zmianą nachylenia zbocza tarasu mikronierówności powierzchni próbki lub/i niejednorodnością właściwości tarciovych badanego materiału (Rys. 1).



Rys. 1. LFM (Lateral Force Microscope) skrzywienie cantilevera wywołane: (A) zmianą siły tarcia na skutek zmian własności materiału; (B) wystąpieniem tarasów
 Fig. 1. LFM (Lateral Force Microscope) – torsion of the cantilever caused by:
 A. Variations of friction force caused by changes of material properties
 B. Variations of surface topography

Aby rozdzielić te dwa efekty należy prowadzić jednocześnie pomiar odkształcenia beleczki pomiarowej zarówno w płaszczyźnie pionowej (obraz topograficzny AFM) jak i poziomej.

Siły styczne nie są zależne od kierunku skanowania a kontrast pomiędzy uzyskiwanymi obrazami rozkładu sił poprzecznych odzwierciedla pochylenie mikronierówności wzdłuż osi ox.

W niniejszym referacie przedstawiono zastosowanie mikroskopu sił atomowych do zbadania własności tarciovych ultracienkich powłok wytworzonych techniką elektroplazmową [L. 2, 3] oraz wpływu prowadzenia procesu osadzania warstw (zmiana temperatury podłoża) na własności uzyskanych powłok.

ULTRACIENKIE POWŁOKI WYTWARZANE TECHNIKĄ ELEKTROPLAZMOWĄ

Procesy chemiczne zachodzące pod działaniem plazmy nierównowagowej są szeroko stosowane do powierzchniowej obróbki metali i tworzyw organicznych, w procesach wytwarzania obwodów scalonych, ogniw słonecznych, powłok uszczelniających folię z polimerów oraz warstw przeciwo-blaskowych na elementach optyki [L. 4].

W ostatnich latach zaobserwowano wzrost zainteresowania powłokami krzemooorganicznymi otrzymywanymi metodą PE-CVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition). Na Wydziale Chemii PW prowadzono prace nad procesem osadzania cienkich powłok z heksametylodisiloksanu. Powłoki wytwarzano w wyładowaniu barierowym, pod ciśnieniem atmosferycznym, w reaktorze z zewnętrzną elektrodą wysokonapięciową. Otrzymano, między innymi, cienkie warstwy związków krzemu z heksametylodisiloksanu (HMDSO) stosując mieszaninę HMDSO+Ar+NH₃ (40%). Warstwy nanoszono na monokryształ krzemu (100). W procesie wytwarzania powłok zmieniano temperaturę podłoża.

BADANIE NANOTARCIA ULTRACIENKICH POWŁOK WYTWORZONYCH TECHNIKĄ ELEKTROPLAZMOWĄ

Badane próbki

Zbadano własności tarciove dwóch ultracienkich powłok wytworzonych techniką elektroplazmową [L. 2, 3]. Próbki, oznaczone symbolami 047 i 046, wykonano na Wydziale Chemii PW. Analizę chemiczną otrzyma-

nych powłok przeprowadzono za pomocą spektrometru UDS Braga z mikrosondą elektronową firmy Cameca. W **Tabeli 1** przedstawiono warunki prowadzenia procesu osadzania badanych powłok i ich właściwości.

Tabela 1. Powłoki osadzane z HMDSO + Ar + NH₃ (40%) – warunki prowadzenia procesu osadzania powłok, właściwości powłok

Table 1. The films deposited from the mixture of HMDSO+Ar+NH₃ (40%) – experimental conditions of process of deposition and films properties

Oznaczenie próbki	047	046
Mieszanina gazowa:		
HMDSO [ppm]	2640	2640
Amoniak [%]	40	40
Argon [%]	Reszta	Reszta
Temperatura [°C]	150	300
Czas osadzania [min]	15	15
Napięcie międzyszczytowe [kV]	15,7	13,5
Grubość [nm]	40	63
Szybkość osadzania powłoki [nm/min]	2.7	4.2
Współczynnik refrakcji	1,26	1,44
Widmo FTIR (pasma absorpcji)	Si-O-Si Si-CH ₃	Si-O-Si Si-CH ₃

PRÓBKA 047

Powłoka naniesiona techniką elektropłazmową na podłoże krzemu monokrystalicznego (100). Osadzona z mieszaniny HMDSO+NH₃+Ar (heksametylodisiloksan + amoniak + argon) przy temperaturze podłoża 150°C. Całkowita grubość naniesionej powłoki, zmierzona elipsometrem, wyniosła 40 nm.

PRÓBKA 046

Powłoka naniesiona techniką elektropłazmową na podłoże krzemu monokrystalicznego (100). Osadzona z mieszaniny HMDSO+NH₃+Ar (heksametylodisiloksan + amoniak + argon) przy temperaturze podłoża 300°C. Całkowita grubość naniesionej powłoki, zmierzona elipsometrem, wyniosła 63 nm.

Warunki prowadzenia badań

Obrazowanie topografii i rozkładu siły poprzecznej przeprowadzono przy wykorzystaniu kontaktowego modu pracy (Topography/FI) mikroskopu sił atomowych z opcją pomiaru siły poprzecznej (Laboratorium Mikrotribo-

logii Instytutu Mikromechaniki i Fotoniki PW) [L. 5]. Do badań zastosowano cantilevery oznaczone symbolami MS-06AU typ B (firmy Park Scientific Instruments – USA) oraz SCS12 typ F (firmy NT-MDT Co – Rosja).

Doświadczenia przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych w atmosferze powietrza, przy ciśnieniu atmosferycznym, temperaturze pokojowej $22^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$, przy wilgotności $50\% \pm 5\%$.

Forma przedstawienia wyników badań

W wyniku przeprowadzonych pomiarów otrzymano rozkład topografii oraz siły poprzecznej na badanej powierzchni.

Wyniki badań przedstawiono w postaci płaskiego (2D) i przestrzennego (3D) obrazu topografii próbki oraz dwuwymiarowego (2D) obrazu rozkładu siły poprzecznej. Przedstawiono także przekroje poprzeczne profilu topograficznego i odpowiadające im wykresy siły poprzecznej oraz histogram obrazu topografii i rozkładu siły tarcia (siły poprzecznej).

Z obrazów 2D i 3D usunięto szumy (zastosowano filtr median).

Dyskusja i wnioski

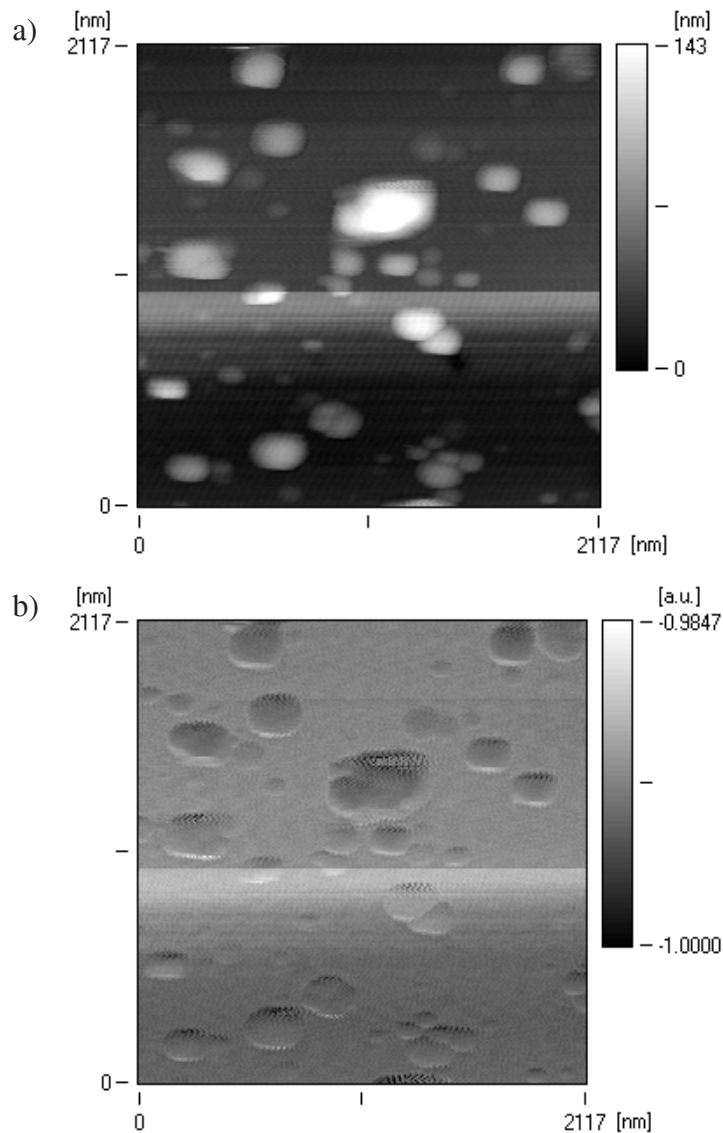
Ultracienkie powłoki osadzone z mieszaniny gazów HMDSO+ Ar + NH₃ (40%) w temperaturach 150°C i 300°C (próbki 047 i 046) okazały się trudne w badaniach ze względu na bogatą strukturę (bardzo duże utkanie tarasów i ich wpływ na wyznaczone siły poprzeczne) oraz ze względu na prawdopodobieństwo zależności własności tarciovych od miejsca badań (inne we wgłębieniach inne na wypiętrzeniu tarasów mikronierówności).

Na wykresie siły poprzecznej, dla powierzchni o jednolitych, homogenicznych właściwościach tarciovych i tarasowej strukturze mikronierówności, wystąpią skokowe zmiany wartości siły poprzecznej na progach tarasów. Po przejściu progu tarasu wartość siły poprzecznej wróci do poprzedniej wartości, takiej samej jak na innych homogenicznych częściach próbki. W przypadku próbki niehomogenicznej zmiana siły poprzecznej będzie niezależna od zmian topografii powierzchni próbki i będzie opisywać własności tarciove materiału.

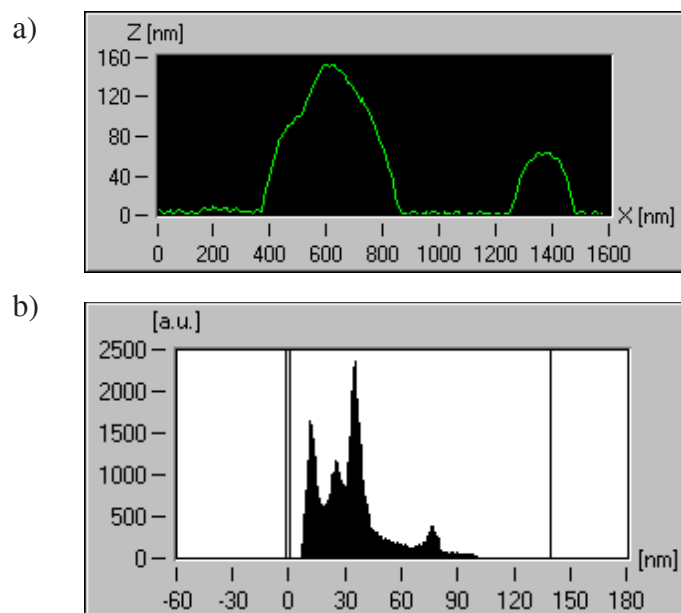
Badania ultracienkich powłok wytworzonych techniką elektropłazmową przeprowadzone były kilkakrotnie (w kilku różnych miejscach próbki) z wykorzystaniem wielu obszarów skanowania (od 16000 nm × 16000 nm do 510 nm × 510 nm). Najmniejszy obszar skanowania wynikał nie z ograniczenia sprzętowego lecz z własności badanej powłoki.

Badania zostały wykonane przy skanie w kierunku $+x$ i $-x$. Kierunek skanowania nie miał wpływu na otrzymane wyniki badań.

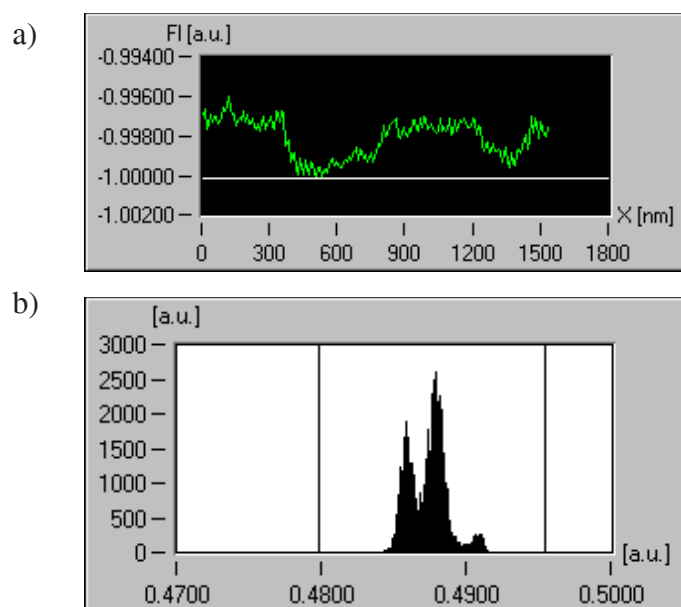
Na **Rysunkach 2+6** przedstawiono topografie badanej powłoki 047, przykładowe rozkłady siły poprzecznej na skanowanej powierzchni, przykładowe przekroje poprzeczne topografii powierzchni i odpowiadające im zmiany wartości siły poprzecznej.



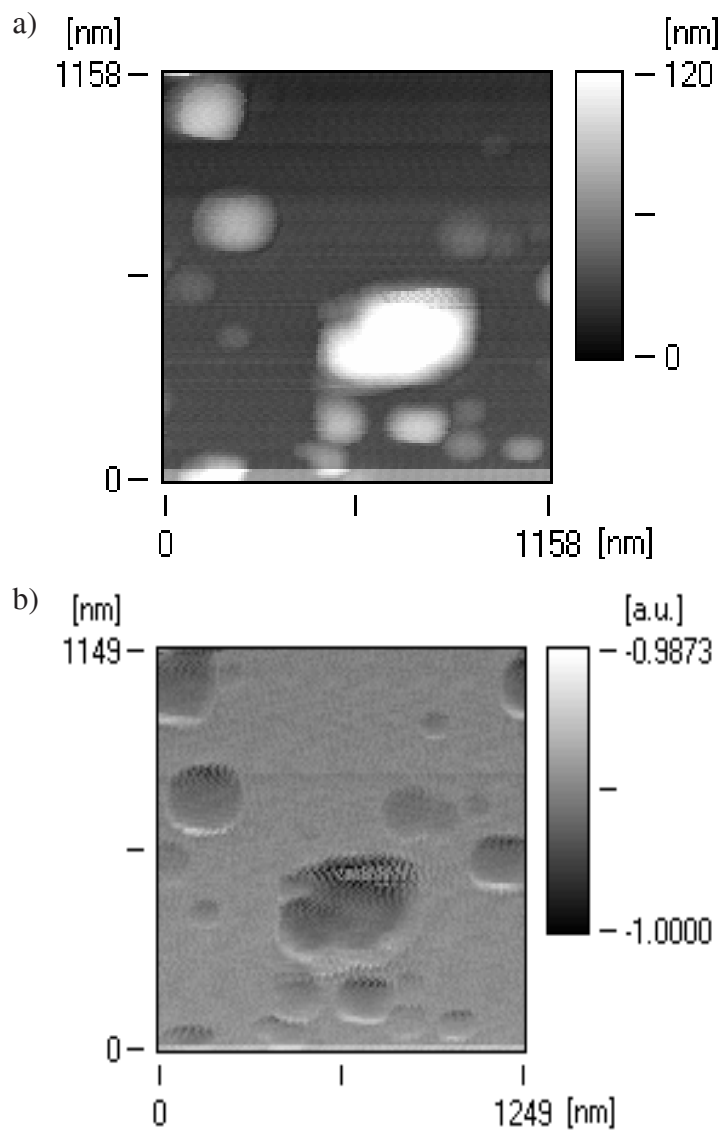
Rys. 2. Próbka 047: a) topografia powierzchni powłoki (2D), b) rozkład siły poprzecznej
Fig. 2. Sample 047 a. Surface topography of film (2D); b. Distribution of lateral force



Rys. 3. Próbkę 047 – Topografia powierzchni powłoki: a) przekrój, b) histogram
Fig. 3. Sample 047 – Surface topography of film a. cross-section; b. histogram

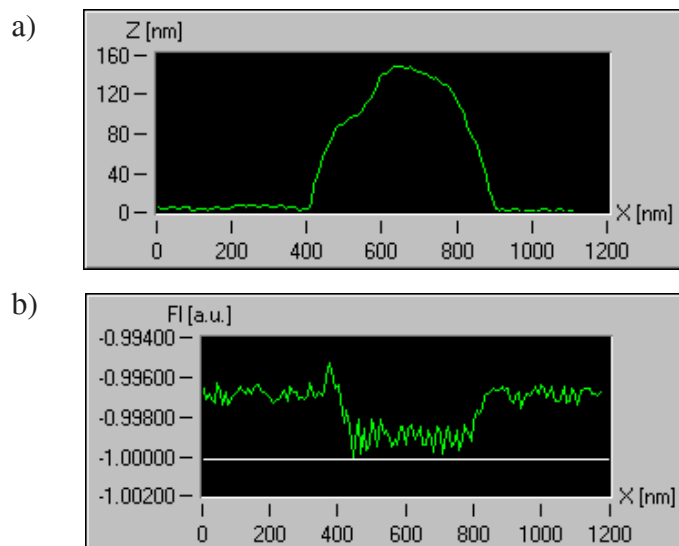


Rys. 4. Próbkę 047 – Rozkład siły poprzecznej: a) przekrój, b) histogram
Fig. 4. Sample 047 – Distribution of lateral force a. cross-section; b. histogram



Rys. 5. Próbka 04: a) topografia powierzchni powłoki (2D), b) rozkład siły poprzecznej
Fig. 5. Sample 047. a. Surface topography of film (2D); b. Distribution of lateral force

Po porównaniu przekroju poprzecznego topografii badanej powierzchni z odpowiadającym mu przekrojem rozkładu siły poprzecznej i analizie histogramu rozkładu siły poprzecznej można stwierdzić, że zmiany wartości siły poprzecznej F_l (**Rys. 4a** i **Rys. 6b**) są związane ze zmianą własności tarcowych na powierzchni próbki 047.



Rys. 6. Próbka 047: a) topografia powierzchni – przekrój, b) rozkład siły poprzecznej – przekrój

Fig. 6. Sample 047. a. Surface topography of film – cross-section; b. Distribution of lateral force – cross-section

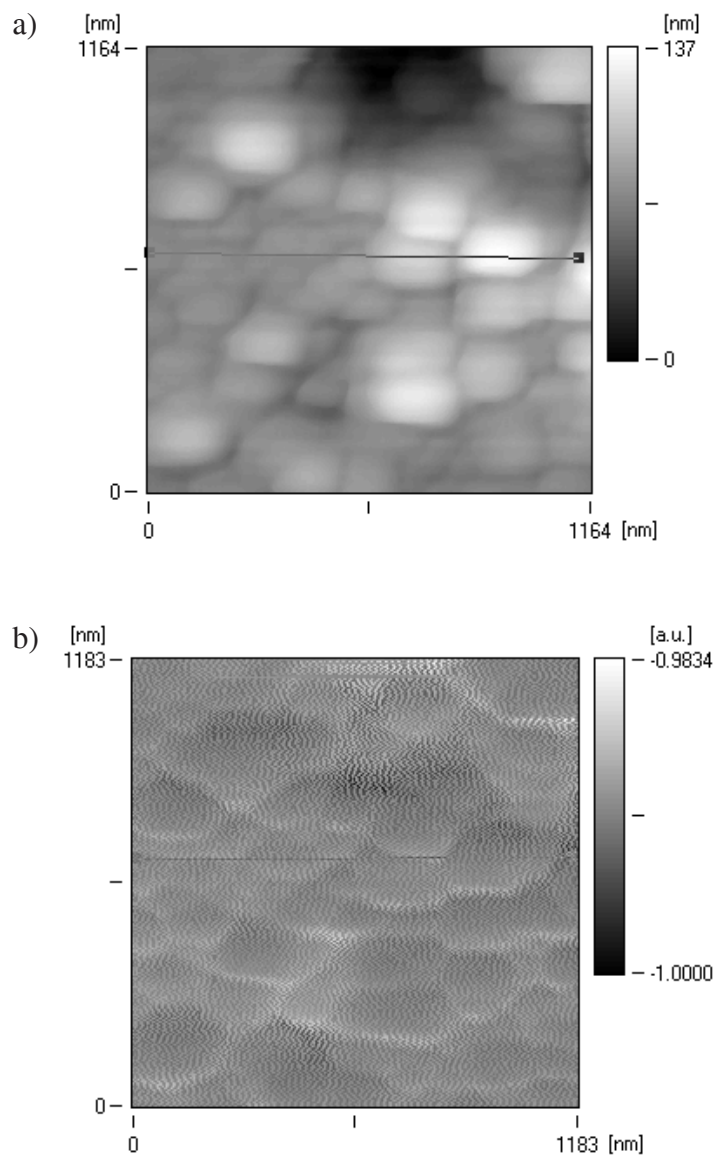
Powłoka, wytwarzana techniką elektroplazmową, osadzana z mieszaniny HMDSO+Ar+NH₃ (40%) przy temperaturze podłoża 150°C (próbka 047) ma inne własności tarciovne na wzniesieniach i inne we wgłębieniach tarasów mikronierówności powierzchni.

Niejednorodność własności tarciovych powierzchni próbki 047 związana jest z procesem osadzania powłoki – powłoka zawiera substancje organiczne.

Mniej jednoznaczne wyniki otrzymano w przypadku badania własności tarciovych powłoki osadzonej z mieszaniny HMDSO+Ar+NH₃ przy temperaturze podłoża 300°C (próbka 046).

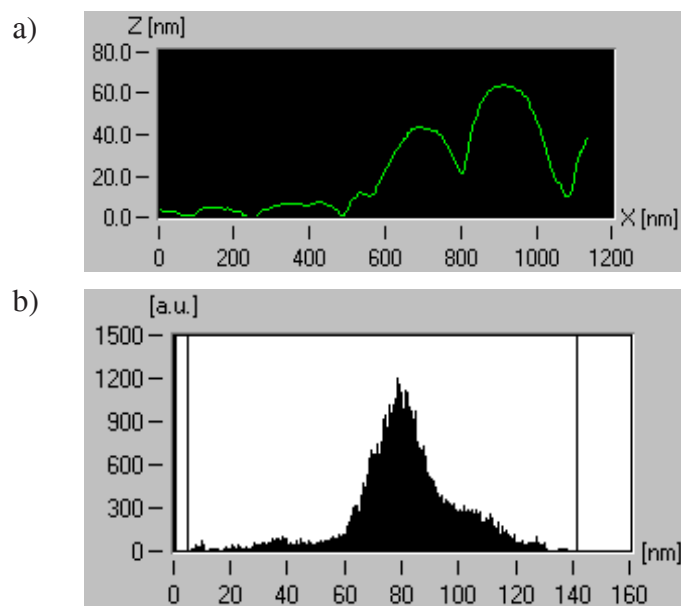
Na **Rysunkach 7+9** przedstawiono topografię badanej powłoki 046, rozkład siły poprzecznej na skanowanej powierzchni, przykładowy przekrój poprzeczny topografii powierzchni i odpowiadające mu zmiany wartości siły poprzecznej.

Otrzymane przekroje poprzeczne topografii badanej powierzchni i odpowiadające im zmiany wartości siły poprzecznej oraz histogramy rozkładu siły poprzecznej świadczą, że na powierzchni powłoki osadzonej z mieszaniny HMDSO+NH₃+Ar przy temperaturze podłoża 300°C (próbka 046) dominują struktury o jednorodnych własnościach tarciovych. Zmia-

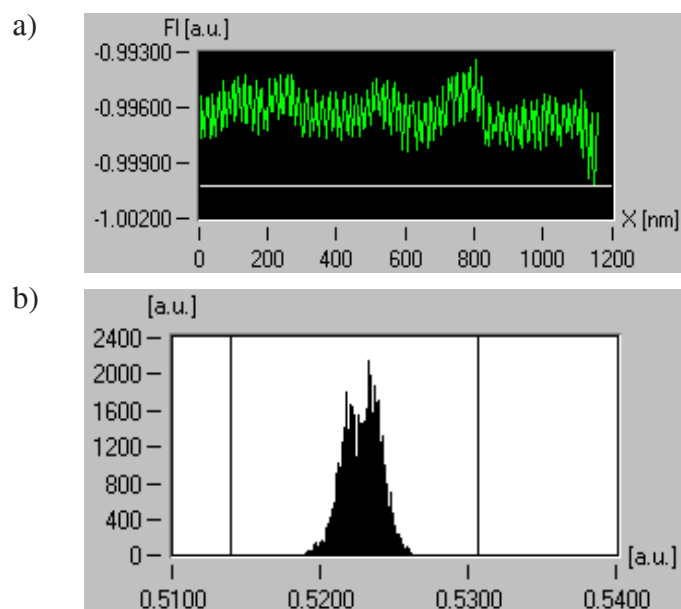


Rys. 7. Próbka 046: a) topografia powierzchni powłoki (2D), b) rozkład siły poprzecznej

Fig. 7. Sample 046. a. Surface topography of film (2D); b. Distribution of lateral force



Rys. 8. Próbka 046 – Topografia powierzchni powłoki: a) przekrój, b) histogram
Fig. 8. Sample 046 – Surface topography of film. a. cross-section; b. histogram

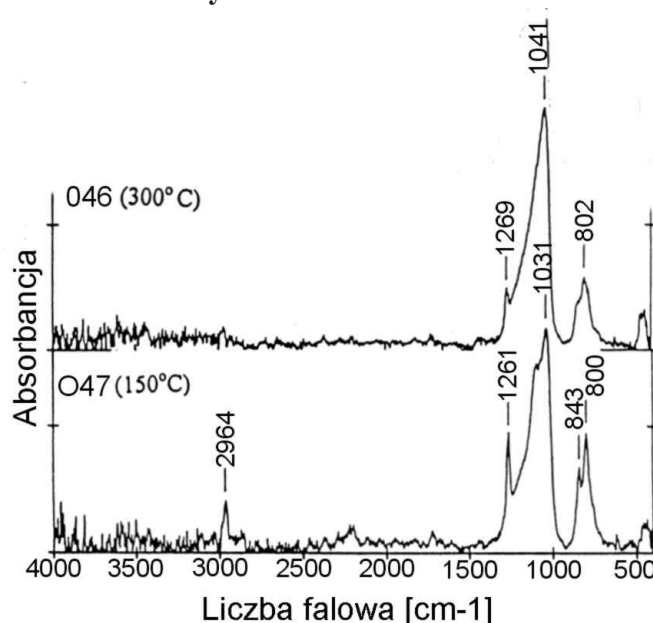


Rys. 9. Próbka 046 – Rozkład siły poprzecznej: a) przekrój, b) histogram
Fig. 9. Sample 046 - Distribution of lateral force. a. cross-section; b. histogram

ny wartości siły poprzecznej F_l (**Rys. 9a**) zależą od zmian profilu topograficznego powierzchni próbki 046.

Otrzymane, przy pomocy mikroskopu sił atomowych, wyniki badań własności tarciovych ultracienkich powłok wytwarzanych techniką elektroplazmową (próbka 047 i 046) potwierdza analiza chemiczna przeprowadzona za pomocą spektrometru UDS Braga z mikrosondą elektronową firmy Cameca.

Widma FTIR powłok osadzonych z mieszaniny HMDSO+Ar+NH₃ (40%) przedstawiono na **Rys. 10**.



Rys.10. Widmo FTIR powłok osadzanych z mieszaniny HMDSO+Ar+NH₃ (40%) w temperaturze 150°C (próbka 047) i 300°C (próbka 047)

Fig. 10. FTIR spectrum of films deposited from mixture of HMDSO + Ar + NH₃ (40%) at temperature of 150 °C (sample 047) and of 300°C (sample 046)

Powłoki otrzymane przy temperaturze podłoża 150°C (próbka 047) zawierają nieznaczne ilości domieszek organicznych odpowiadających pasmom Si-CH₃ – 2964 cm⁻¹, 1261 cm⁻¹ i 843 cm⁻¹ (**Rys. 10**). Intensywność tych pasm maleje wraz ze wzrostem temperatury osadzania powłoki. Powłoka 046, osadzana przy wyższej temperaturze (300°C), zawiera mniej substancji organicznych – o czym świadczy brak pasma o liczbie falowej 2964 cm⁻¹ oraz słabsze pasmo 1269 cm⁻¹ w widmie FTIR.

PODSUMOWANIE

Temperatura osadzania powłok z mieszaniny HMDSO+Ar+NH₃ (40%) wpływa na zawartość substancji organicznych w powłoce, tym samym na uzyskiwane topografie badanych powierzchni i ich własności tarciove.

Powłoka osadzana przy temperaturze podłoża 150°C (próbka 047) zawiera substancje organiczne, które powodują niejednorodny rozkład własności tarciowych na badanej powierzchni. Powłoka osadzana przy temperaturze podłoża 300°C (próbka 046) zawiera bardzo mało substancji organicznych, charakteryzuje się jednorodnym rozkładem własności tarciowych na całej powierzchni.

LITERATURA

1. Bushan B.: Handbook of Micro/Nanotribology, 2nd ed., CRC Press, Boca Raton 1998.
2. Misiak M., Rymuza Z., Rżanek-Boroch Z., Schmidt-Szałowski K., Janowska J.: The Effects of Deposition and Test Conditions on Nanomechanical Behaviour of Ultrathin Films Produced by PECVD Process at Atmospheric Pressure. 3rd International Colloquium Micro-Tribology'2001, Jastarnia 2001.
3. Rżanek-Boroch Z., Janowska J., Dudziński K., Schmidt-Szałowski K.: Thin Films of Silicon Compounds Deposited by Filamentary Barrier-Discharge. 15th International Symposium on Plasma Chemistry, vol. V, s. 1817–1822, Orleans, France 2001.
4. Schmidt-Szałowski K., Fabianowski W., Sentek J., Rżanek Boroch Z.: Powłoki nieorganiczne wytwarzane techniką elektropłazmową. Przemysł chemiczny 77/7, s. 253–257.
5. Janowska J.: Raport tematu – Badanie nanotarcia ultracienkich powłok, IMiF PW, Warszawa 2001.

Recenzent:
Ryszard MARCZAK

Summary

Atomic Force Microscopes (AFM) are used mainly to study surface topography. AFM with the possibility to measure lateral force in the Laboratory of Microtribology of the Institute of Micromechanics and

Photonics of the Warsaw University of Technology enables during scanning the measurement of the lateral force between the tip of the cantilever and the tested surface. The lateral force is representative of the micro-scale friction.

The paper presents the results of the application of this microscope to study frictional properties of the ultrathin films deposited on silicon by electroplasma technique.

The films were deposited under various substrate's temperatures (sample 046 – 300°C, sample 047 – 150°C) to study the effect of temperature on the frictional properties of the films.

Wiesław LESZEK*

**ROZWAŻANIA O PODSTAWACH TRIBOLOGII.
2. PROCESY DYFERENCJACJI I INTEGRACJI
WIEDZY TRIBOLOGICZNEJ**

**CONSIDERATION OF TRIBOLOGY BASIS
2. PROCESSES OF TRIBOLOGICAL KNOWLEDGE
DIFFERENTIATION AND INTEGRATION**

Słowa kluczowe:

dyferencjacja wiedzy, rekombinacja wiedzy, integracja wiedzy

Key-words:

knowledge differentiation, knowledge recombination, knowledge integration

Streszczenie:

W publikacji przedstawiono trzy kolejne fazy przemian struktur wewnętrznych dyscypliny naukowej: dyferencjację wiedzy, rekombinację wiedzy i integrację wiedzy. Omówienie to uzupełniono komentarzem interpretującym przemiany struktury wiedzy tribologicznej.

* Politechnika Poznańska, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych,
ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań.

WSTĘP

Artykuł ten jest kolejną publikacją z rozpoczętego referatem wygłoszonym na Szkole Tribologicznej w Łądku Zdroju w 2001 r. cyklu „Rozważania o podstawach tribologii”. Temat artykułu wywodzi się z referatu wygłoszonego na Kongresie Eksploatacyjnym w Krynicy Górskiej w 2000 r. pt. „Rozwój tribologii w świetle prawidłowości rozwoju nauki” [L. 1]. W publikacji tej przedstawiono trzy kolejne fazy przemian struktur wewnętrznych dyscypliny naukowej dyferencjację wiedzy, rekombinację wiedzy i integrację wiedzy. Stwierdzenie to uzupełniono komentarzem interpretującym owe przemiany następująco:

Kumulowanie się wiedzy dotyczącej określonych obiektów lub zjawisk powoduje, że po przekroczeniu pewnego jej zasobu staje się ona trudna do opanowania i wykorzystania. Pojawia się więc tendencja do jej dzielenia na mniejsze jednostki łatwiejsze w analizach i wykorzystaniu praktycznym. Kryteria podziału bywają różne i zależą od specyfiki dyscypliny naukowej, a raczej od charakterystycznych cech przedmiotu jej zainteresowania. Kiedy podziały wewnętrzne osiągną pewien poziom szczegółowości następuje faza ich łączenia w różnych konfiguracjach problemowych, przedmiotowych, metodycznych itp. Faza ta została nazwana fazą rekombinacji wiedzy polegającej na tworzeniu mniej lub bardziej trwałych struktur wewnętrznych zawierających elementy syntezy fragmentów istniejącej wiedzy. Faza rekombinacji jest fazą swoistego porządkowania wiedzy bez jej tarcowego wzbogacania. Zjawisko to pojawia się dopiero w fazie integracji, w której dokonuje się synteza elementów wiedzy z różnych dyscyplinach naukowych opisujących różne aspekty rzeczywistości. W wyniku integracji wiedzy pojawiają się w strukturze nauki w pierwszej kolejności interdyscyplinarne problemy badawcze, a po ich rozwiązaniu również interdyscyplinarna wiedza. Zwykle, w początkowym okresie jej powstawania jest ona przypisywana do zakresu dyscypliny naukowej najszerzej pojmującej swoje problemy badawcze i metody ich rozwiązywania. W miarę rozwoju wiedzy interdyscyplinarnej kształtują się osobne pograniczne dyscypliny naukowe i generowane już w ich ramach problemy badawcze.

Ze względu na konieczność zwrócenia uwagi odbiorców tamtego referatu na inne jeszcze zagadnienia, kwestie dyferencjacji i integracji wiedzy tribologicznej przedstawiono w formie skróconej, syntetycznej.

W tym artykule postanowiono rozwinąć i uzupełnić niektóre problemy podnoszone w tekście poprzednim. Celowość powrotu do tych kwestii

wynika z tego, że na przemiany w wiedzy o tarceniu wynikające z ilościowego przyrostu wiedzy o zjawisku tarcia nałożyły się przemiany wynikające ze zmiany przeznaczenia i charakteru tej wiedzy z przyrodniczej na techniczną. Stało się to wtedy, kiedy wiedzę przyrodniczą (fizykalną) o tarcieniu zaczęto wykorzystywać do sterowania nim w węzłach kinematycznych maszyn i urządzeń. Inaczej mówiąc, wtedy kiedy zwrócono uwagę na to, że od tarcia, jego skutków i sposobów sterowania jego parametrami zależą funkcjonalne, trwałościowe i niezawodnościowe cechy tych węzłów.

Konsekwencją tego nowego miejsca wiedzy o tarcieniu, i tym razem także o zużyciu i smarowaniu węzłów kinematycznych (nazywanymi także systemami tribologicznymi) były odmienne niż w innych dyscyplinach naukowych przemiany struktur wewnętrznych. Temu procesowi postanowiono poświęcić ten artykuł.

WIEDZA POTOCZNA I POCZĄTKI NAUKOWEJ WIEDZY O TARCIE

Z tarcieniem jako zjawiskiem fizycznym (przyrodniczym) zetknął się człowiek wtedy, kiedy był zmuszony przemieścić w przestrzeni obiekt, który był cięższy niż możliwości przeniesienia go. Ujawnił się wtedy podstawowy atrybut tarcia – opór ruchu w sytuacji styku z innym obiektem. Atrybut ten był tym groźniejszy, że ówczesne źródła napędu były zbyt słabe, aby człowiek mógł przemieszczać dowolne obiekty na dowolne odległości. Badania historyczne ujawniły, że już w głębokiej starożytności znano wiele sposobów ograniczania negatywnych skutków tarcia, znano także możliwości jego wykorzystania do celów użytkowych. Tworzył się już wtedy zbiór informacji nazywany **wiedzą potoczną**.

Wiedza potoczna powstawała w rezultacie przypadkowych zwykle spostrzeżeń i doświadczeń uzyskiwanych metodą prób i błędów. Można o niej powiedzieć, że:

- nie są znani jej twórcy i jest przekazywana zwykle przez osobiste kontakty, w niektórych tylko przypadkach doczekała się zapisu prezentowanych treści,
- nie zawsze ma naukowe uzasadnienie, a jeśli je posiada, to ma ono wobec niej charakter wtórny,
- jej wykorzystywanie jest nawykowe, wynikające z zasady „zawsze tak robiono”, zwykle więc przy jej stosowaniu nie liczone się z regułami efektywności [L. 2].

H. Garnfinkel [L. 3] wymienił kilkanaście cech potocznego opisu rzeczywistości, z których najważniejsze wydają się być następujące:

1. Sens przypisywany opisowi jest z punktu widzenia zbiorowości tym, którego się od niego wymaga. Wymaga się przy tym, by inny człowiek dokonywał takiego samego przypisania sensu.
2. Z punktu widzenia użytkownika, usankcjonowanym stosunkiem między opisywanymi przejawami przedmiotu i przedmiotem intencjonalnym – przejawiającym się w opisywany sposób jest stosunek niewątpliwej odpowiedniości.

Wynika z tego, że akceptacja wiedzy potocznej oparta jest na swoistej umowie funkcjonującej między użytkownikami, którzy w ramach przyjętej konwencji nie kwestionują jej zasadności.

3. Z punktu widzenia użytkownika występuje charakterystyczna rozbieżność między publicznie przez środowisko uznanym z prywatnym, ukrytym sensem opisu i ten prywatny, indywidualny sens nie jest ujawniony.

Oznacza to, że cechy wiedzy potocznej, zwłaszcza jej treść budzą często wątpliwości wśród użytkowników, co prawdopodobnie jest przyczyną podejmowania prób jej naukowego zweryfikowania. Zdarza się, że po sprawdzeniu wiedza potoczna już jako wiedza naukowa zostaje włączona do zasobów określonej dyscypliny naukowej.

Wiedza potoczna może być uważana za pojęcie nadrzędne wobec wiedzy zdroworozsądkowej, która cechuje się znaczną nieokreślonością. Według E. Nogła [L. 4] nieokreśloność ta przejawia się:

- nieostrością terminów, co nie pozwala na precyzyjne odróżnienie przedmiotów denotowanych przez dany termin od tych, które nie są jego desygnatami,
- brakiem precyzji w charakteryzowaniu różnic pomiędzy przedmiotami oznaczanymi przez dany termin wiedzy zdroworozsądkowej (co wynika w znacznym stopniu z braku odpowiednio sprecyzowanych miar tej wiedzy),
- sądy i poglądy wiedzy zdroworozsądkowej nie wyjaśniają zazwyczaj „dlaczego jest tak, że ...”, a jeżeli podają takie wyjaśnienia, to nie są one oparte na metodzie naukowej,
- brak kontroli poglądów wiedzy zdroworozsądkowej metodami stosowanymi do kontroli twierdzeń (lub innych zdań prawdziwych lub uznawanych za takie) wiedzy naukowej.

W odróżnieniu od wiedzy potocznej wiedza naukowa wyróżnia się metodami uzyskiwania i weryfikacji informacji, wyróżnia się istnieniem określonych reguł postępowania zanim spostrzeżenie dokonane przypadkowe lub w wyniku świadomego poszukiwania włączone zostanie do systemu wiedzy. Fakty i teorie naukowe muszą przejść okres krytycznych badań i prób ze strony innych kompetentnych i bezstronnych osób i muszą się okazać na tyle przekonujące, by zyskać niemal powszechną akceptację. Celem nauki jest nie tylko zdobywanie informacji czy wypowiedanie zdań całkowicie niesprzecznych, dąży ona do jak najszerzej akceptacji racjonalnych poglądów [L. 2].

Zajmiemy się teraz przemianami strukturalnymi zachodzącymi w wiedzy potocznej, która jako genetycznie starsza od wiedzy naukowej znacznie ją wyprzedzała. Zawarte tu spostrzeżenia dotyczą przede wszystkim wiedzy o tarczu.

Pierwszym zjawiskiem jakie ujawniło się podczas wykorzystywania wiedzy potocznej do celów technicznych było zjawisko propagacji tej wiedzy. Czynnikiem sprzyjającym propagacji wiedzy stała się wymiana handlowa. Dzięki wynalezieniu koła, a potem chomąta można było przewozić towary na znaczne odległości. Towary zaś stanowiły źródło informacji technicznej, przede wszystkim o tym, że takie przedmioty można wytwarzać. Przez naśladownictwo, posługując się własnymi, lokalnie dostępnymi surowcami i stosując posiadane swoiste narzędzia odtwarzano, a także doskonalono procesy technologiczne wytwarzanie przedmiotów wzbudzających zainteresowanie. Najczęściej jednak naśladowcy byli zmuszeni do posługiwania się nowymi, nie stosowanymi uprzednio narzędziami. Dzięki temu następowało wyrównywanie się poziomów cywilizacyjnych różnych regionów. W ten sposób tworzyły się kręgi cywilizacyjne łączone ponadplemiennymi więzami kulturowymi [L. 5].

Doskonaląc się wiedza techniczna sprzyjała powstawaniu systemów produkcyjnych z wariantowym wykorzystaniem surowców i operacji technologicznych. Stanowiło to początek zjawiska integracji wiedzy, chociaż zachowywała ona wszystkie atrybuty wiedzy potocznej.

Najwcześniejszym zadaniem wyłonionym w kwestii posługiwania się tarczem i przeciwdziałania jego objawom było zmniejszenie oporów ruchu podczas przemieszczania dużych mas. Skalę trudności jakie należało pokonać ilustrują następujące przykłady [L. 6]:

- „Iwia brama” w Mykenach z epoki kultury kretańskiej zbudowana jest z bloków kamiennych o wadze do 125 ton,

- niektóre obeliski stawiane w starożytnym Egipcie, posiadające wysokość 30–40 m, ważą 300–400 ton.

Wstępna integracja wiedzy o tarceniu będąca skutkiem jej dyfuzji w ówczesnych kręgach kulturowych pozwoliła na konstatację, że opór przemieszczeń ciał jest mniejszy przy toczeniu niż przy ślizganiu oraz, że powierzchnie ciał stałych zwilżone cieczą stawiają opór mniejszy niż powierzchnie suche, przy czym niektóre ciecze dłużej zachowują te właściwości. Według D. Dowsona [L. 7] znaleziska dokonane przez archeologów na Bliskim Wschodzie świadczą o tym, że w starożytności świadomie stosowano tarcie w urządzeniach wiertniczych (przekazywanie ruchu przez sznur obracający oś) oraz w dźwigach, znano zasadę wykorzystywania lin przy cumowaniu okrętów (intuicyjnie wykorzystywano zasadę tzw. „stożka tarcia”), znano łożyska oporowe i ślizgowe, smarowanie ich smarami roślinnymi, zwierzęcymi i mineralnymi (nafta), znano zasady stosowania ścierniwa do szlifowania i polerowania kamieni i wyrobów metalowych.

Ze względu na to, że wiedza o tarceniu na poziomie wiedzy potocznej nie była zapisywana następowała jej selekcja przy przekazywaniu z pokolenia na pokolenie. Po prostu, te sposoby sterowania i posługiwania się tarcieniem, które okazywały się być nieprzydatne były zapominane. Bardzo często również przypominane lub odkrywane na nowo. Brak archiwizowania wiedzy potocznej był poza brakiem informacji o jej genezie, największym mankamentem tej wiedzy.

Ocena przydatności wiedzy potocznej wynikała ze znaczenia użytkowego obiektu technicznego, którego dotyczyła. Następową kumulacja wiedzy wokół obiektów i procesów technologicznych ich wytwarzania i użytkowania.

Gromadzona i systematyzowana wiedza potoczna stanowiła podstawę do podjęcia prób jej bardziej ścisłej interpretacji i filozoficznego uogólnienia. Tarcie, jego przyczyny i skutki stały się więc przedmiotem zainteresowania ludzi nie związanych z produkcją, nie posiadających doświadczeń warsztatowych, co pozwalało im na rozpatrywanie tych problemów z pozycji posiadanej wiedzy o materii i występujących tam zjawiskach. Mogli oni prowadzić badania i rozważać tarcie jako zjawisko przyrodnicze, całkowicie nie związane z techniczną działalnością człowieka. Traktując tarcie w sztucznych układach technicznych jako szczególny przypadek tarcia w przyrodzie mogli tworzyć założenia naukowej wiedzy o tarcieniu [L. 8].

POWSTANIE I ROZWÓJ NAUKOWEJ WIEDZY O TARCIE

Zasadniczego przełomu w problematyce sterowania tarcie dokonała rewolucja przemysłowa jaka nastąpiła w końcu XVIII i na początku XIX w. Wprowadzenie maszyn i narzędzi zastępujących pracę człowieka postawiło nowe zadanie w dziedzinie sterowania tarcie:

- 1) brak w początkowym okresie rewolucji przemysłowej uniwersalnego źródła napędu przy znacznym skomplikowaniu mechanizmów i zastosowaniu w jednej maszynie wielu węzłów kinematycznych, narażonych na tarcie, pogłębiał problem zmniejszenia oporów ruchu;
- 2) wynalezienie i powszechne zastosowanie maszyny parowej postawiło problem zapewnienia stabilności (równomierności) ruchu maszyn, a więc problemy kształtowania chropowatości warstwy wierzchniej elementów maszyn i zapewnienia optymalnego smarowania;
- 3) zastosowanie maszyny parowej jako źródła napędu spowodowało powstanie typowego schematu konstrukcyjnego: napęd – przełożenie – organ roboczy, co wyłoniło problem przekładni pasowych, ciernych i zębatych;
- 4) produkcja maszyn i narzędzi traktowanych już jako towar rynkowy postawiła problem ich trwałości i niezawodności, a więc problem sterowania zużyciem podczas tarcia, co obok zagadnień materiałowo-konstrukcyjnych i technologicznych zmusiło producentów do podjęcia prób rozwiązywania zagadnień eksploatacyjnych tzn. użytkowania i obsługiwanie maszyn;
- 5) wykorzystanie maszyny parowej jako źródła napędu układów trakcyjnych i upowszechnienie transportu kolejowego ujawniły problem hamowania w maszynach, którego znaczenie wzrosło w początkach XX w. wraz z upowszechnieniem się transportu samochodowego;
- 6) zwiększenie różnorodności wytwarzanych towarów spowodowało intensywny rozwój technologii ich wytwarzania, a więc również rozwój problematyki wykorzystania tarcia jako czynnika technologicznego [L. 8].

Do rozwiązania wygenerowanych przez rozwój techniki problemów inżynierskich nie wystarczała już wiedza potoczna. Musieli zająć się nimi profesjonalnie przygotowani badacze, dając w ten sposób początek naukowej wiedzy o tarcie.

Zgodnie z wcześniejszymi stwierdzeniami w takich sytuacjach powstającą wiedzę przypisywano dominującej dyscyplinie naukowej. Ze względu

du na to, że źródłem powstającej naukowej wiedzy o tarcii i jego skutkach była mechanika traktowana jako część fizyki jej też przypisano zasadniczą część odpowiedzialności za postęp wiedzy i jej wykorzystanie techniczne. Zapoczątkowana została integracja wiedzy potocznej z tworzącą się wiedzą naukową o tarcii.

Pierwszym zjawiskiem które towarzyszyło procesowi tej integracji była reinterpretacja wiedzy potocznej i nadanie jej porządku logicznego i uzasadnień charakterystycznych dla wiedzy naukowej uzyskiwanej przez stosowanie ścisłych postulatów metody naukowej. Elementy wiedzy potocznej, które nie mogły być zinterpretowane naukowo były odrzucane, inne stanowiły źródło problemów badawczych podejmowanych przez uczonych. Rezultatem ich rozwiązania było nie tylko rozszerzenie zakresu zastosowań technicznych wiedzy naukowej o tarcii, ale także powstanie modeli interpretacyjnych pełniących do chwili obecnej funkcji substitutów teorii [L. 8].

Cechą charakterystyczną wiedzy o tarcii jest występowanie w niej pewnych rudymetów doświadczeń warsztatowych i wiedzy potocznej.

Razem z rozwojem wiedzy o tarcii, jego skutkach i sposobach sterowania nimi następowała specjalizacja tej wiedzy i jej różnicowanie (dyferencjacje). Przekształcenie się wiedzy o tarcii z wiedzy fizycznej w wiedzę techniczną nastąpiło wtedy, kiedy w problematyce przeciwdziałania skutkom tarcia przestał dominować opór ruchu i priorytet uzyskało zużycie elementów węzłów kinematycznych, a w konsekwencji utrata zdolności do realizowania przewidzianych dla nich funkcji w maszynach i urządzeniach technicznych. Do kategorii wiedzy o tarcii i jego skutkach: tarcia i zużycia dołączono później trzecią składową tej wiedzy, a mianowicie wiedzę o smarowaniu węzłów kinematycznych [L. 9]. Powstała triada kategorii tribologicznych tarcie, zużycie i smarowanie, traktowana integralnie jako pewna całość, w ramach której następuje kumulowanie się wiedzy (tym razem już łącznej) wokół obiektów technicznych. Zjawisko to przyniosło rozdzielenie wiedzy tribologicznej na wiedzę podstawową obejmującą ogólną wiedzę o tarcii, zużyciu i smarowaniu wspólną dla wszystkich (a przynajmniej dla znacznej części) obiektów technicznych oraz na wiedzę specjalistyczną dotyczącą specyficznych zjawisk związanych z tarciami zachodzących w poszczególnych grupach obiektów technicznych. Znaczną część wiedzy specjalistycznej stanowią reguły postępowania przy optymalnym projektowaniu, wytwarzaniu i eksploatacji obiektów technicznych, w których występuje tarcie.

Kumulowanie się wiedzy specjalistycznej wokół obiektów technicznych spowodowało wtórną dyferencjację wcześniej obszernych zakresów wiedzy. Przy zachowaniu podstawowej wiedzy o tarcu jako wiedzy bazowej w ramach obu pozostałych kategorii następuje coraz bardziej widoczny rozdział według układu: obiekt – zużywanie oraz obiekt – smarowanie. Wiedza tribologiczna jest dzielona na wiele różnych sposobów. Uzasadnia to pogląd, że znajduje się ona w fazie rozwiniętej dyferencjacji [L. 1].

Zróznicowana i rozdzielona wiedza tribologiczna wyraźniej niż w przypadku całościowych ujęć tej wiedzy ujawnia swoje braki i słabości. Dlatego systematycznie ponawiane są próby ich wyeliminowania przez rekombinację istniejącej wiedzy oraz integrację wewnętrzną i integrację międzydyscyplinową.

Rekombinacja wiedzy tribologicznej polega na łączeniu odosobnionych dotychczas elementów wiedzy według kryteriów wynikających z celów tego połączenia, zwykle problemu technicznego wymagającego rozwiązania. Elementy łączone ze sobą zachowują logiczną niezależność a struktura powstająca w wyniku rekombinacji ma zwykle układ szeregowy.

Integracja wewnętrzna jest wyższą formą rekombinacji, ponieważ w jej rezultacie powstaje synteza wiedzy. Użytkownik tak zbudowanego systemu wiedzy nie operuje kolejno niezależnymi jej elementami a zadaniami formułowanymi drogą wnioskowania z przesłanek, którymi są elementy syntezowanej wiedzy. Integracja wewnętrzna wiedzy tribologicznej przynosi co prawda nowe, często ciekawe spojrzenie na wcześniej znane fakty naukowe ale jej możliwości interpretacyjne nie wykraczają poza zakres wiedzy znanej przed syntezą. Szansą na wzbogacenie tych możliwości jest integracja międzydyscyplinowa. Polega ona na tworzeniu modeli interpretacyjnych łączących wiedzę tribologiczną z wiedzą zaczerpniętą z dyscyplin nie tworzących dotychczas wyraźnych związków z tribologią.

Procesy integracji międzydyscyplinarnej zostały zapoczątkowane kilkadziesiąt lat temu i miały w Polsce lokalne apogeum w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku. W późniejszym okresie proces integracji wiedzy o tarcu z fizyką i chemią ciała stałego oraz chemią fizyczną uległ zahamowaniu. Można przyjąć hipotezę, że przyczyną tego stanu rzeczy było wyczerpanie się prostych i łatwych w interpretacji problemów badawczych oraz trudna do przełamania dla tribologów bariera wiedzy fizycznej. Stąd trudności w tworzeniu koncepcji badawczych umożliwiających naturalne związki interdyscyplinarne. Niezależnie jednak od okresowego zahamowania procesów integracyjnych jest to zjawisko nieuchronne.

ZAKOŃCZENIE

Przedstawione w tym artykule zagadnienia dotyczą prostych form integracji i dyferencjacji wiedzy tribologicznej i towarzyszących tym procesom innych zmian strukturalnych w zasobie wiedzy o tarczu, zużyciu i smarowaniu. Formy te stanowią wyjście do bardziej złożonych postaci integracji nauki np. do tworzenia systemów dyscyplin naukowych lub ich konglomeratów. Kwestie te staną się przedmiotem analizy w następnych publikacjach z cyklu „Rozważania o podstawach tribologii”.

LITERATURA

1. Leszek W.: Rozwój tribologii w świetle prawidłowości rozwoju nauki. ZEM Nr 2(126), 2001.
2. Leszek W.: Badania empiryczne. Wybrane zagadnienia metodyczne. Wyd. ITE, Radom 1997.
3. Garnfinkel H.: Aspekty problemu potocznej wiedzy o strukturach społecznych [w:] Fenomenologia i socjologia. PWN, Warszawa 1989.
4. Nogel E.: Struktura nauki. PWN, Warszawa 1976.
5. Bednarczyk H., Leszek W., Wojciechowicz B.: Relacje edukacyjne człowiek – maszyna. Wyd. ITE, Radom 1995.
6. Bublejnikov F. D., Minchenkov E. Ja.: Oчерk razvitija klassichskoj mekhaniki. Wyd. Uchpiedgiz, Moskwa 1961.
7. Dowson D.: History of tribology. Wyd. Longman, Londyn – Nowy Jork 1976
8. Leszek W.: Metodologiczne podstawy badań trybologicznych. PAN – Oddz. w Poznaniu, seria Mechanika i Budownictwo T. 8, PWN, Warszawa – Poznań 1981.
9. Leszek W., Trzos M.: O kontekstowym charakterze wiedzy tribologicznej. ZEM Nr 1(125), 2001.

Recenzent:
Marian SZCZEREK

Summary

The paper presents three consecutive phases of science discipline internal structures transformation namely: knowledge differentiation, knowledge recombination and knowledge integration. The issue discussion is complemented by comments concerning the transformation of tribological knowledge structure.

Wiesław LESZEK*

**ROZWAŻANIA NAD PODSTAWAMI TRIBOLOGII.
3. WSPÓLDZIAŁANIE TRIBOLOGII Z NAUKAMI
PRZYRODNICZYMI**

**DISCUSION ABOUT FUNDAMENTAL PROBLEMS
OF TRIBOLOGY.
Part 3. COOPERATION AMONG TRIBOLOGY AND
BIOLOGICAL SCIENCE**

Słowa kluczowe:

tribologia, nauki przyrodnicze, współdziałanie, relacje

Key-words:

tribology, biological science, cooperation, relations

Streszczenie:

Referat zawiera omówienie relacji między tribologią jako dyscypliną w obszarze nauk technicznych a niektórymi dyscyplinami nauk przyrodniczych. Przedstawiono zagadnienia medyczne i biologiczne, w których uży-

* Politechnika Poznańska, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych,
ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań.

teczna może być interpretacja tribologiczna oraz problemy, w których wiedza przyrodnicza może być zastosowana w tribologii.

WSTĘP

Referat ten stanowi kontynuację cyklu „Rozważania o podstawach tribologii” i jest bezpośrednim przedłużeniem poprzedniego opracowania pt. „Procesy dyferencjacji i integracji wiedzy tribologicznej” [L. 1].

W opracowaniu tamtym przedstawiono wewnętrzne procesy dyferencjacji i integracji wiedzy w obszarze samej tribologii potraktowanej jako osobna dyscyplina w dziedzinie nauk technicznych. Referat ten dotyczy zagadnień integracji tribologii jako dyscypliny naukowej i wiedzy o tarciu, zużyciu i smarowaniu z naukami przyrodniczymi, do których zaliczono także dyscypliny nauk medycznych. Z rozważań wyłączono natomiast fizykę i chemię, ponieważ procesom integracyjnym zachodzącym między tymi naukami a tribologią poświęcono już wcześniej (szczególnie w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku) wiele uwagi i wartościowych publikacji.

Na przykładzie procesów integracyjnych zachodzących między naukami przyrodniczymi a tribologią postanowiono pokazać mechanizm wzajemnego oddziaływania na siebie integrujących się dyscyplin naukowych. Z tego względu w tytule tego referatu zastosowano pojęcie „współoddziaływanie” mające zaznaczyć dwukierunkowe wpływy łączących się dyscyplin. Podjęto więc próbę znalezienia odpowiedzi na pytania: co tribologia może zaoferować naukom przyrodniczym oraz co nauki przyrodnicze mogą przekazać tribologii. Odpowiedzi na te pytania stanowią podstawę struktury tego referatu.

Przy rozpatrywaniu założeń programowych tego referatu warto zwrócić uwagę na to, że współczesne nauki przyrodnicze zawierają nie tylko główne, ogólnie zaakceptowane dyscypliny, takie jak botanika, zoologia (zbudowane na zasadzie przedmiotowej), dyscypliny procesowe np. fizjologia, genetyka, ale także wiele węższych pochodnych dyscyplin i kierunków. Wewnątrz nauk przyrodniczych zaistniała tak daleko posunięta dyferencjacja, że nawet specjaliści bliskich sobie obszarów badań nie zawsze mają wyobrażenia o pracach kolegów. Nawet w podstawowych podręcznikach z dziedziny nauk przyrodniczych, w których idea holistyki powinna być wyważona szczególnie jasno, związki między oddzielnymi rozdziałami są na tyle słabe, że poszczególne zagadnienia można traktować jako

oddzielne i studiować je w wybranej kolejności. Takie samo zjawisko zaczyna działać również w tribologii, która przeżywa fazę różnicowania (dyferencjacji) wewnętrznego. Zdyferencjonowane nauki przyrodnicze i takąż tribologia mogą integrować się tylko w osobnych nie zawsze historycznie po sobie formułowanych i rozwiązywanych problemach. Uzasadnia to dokonanie wyboru tych aspektów integracji nauk przyrodniczych i tribologii są już wyraźnie zauważalne.

Warto także pamiętać, że jak pokazuje historia przyrodoznawstwa, żadna dziedzina nauki nie mogła przejść drogi od konceptualnej różnorodności do rzeczywistej jedności bez integracji metodologicznej. Idee i pojęcia metodologii stanowią nieodzowne źródła wstępnych asocjacji, bez których nie można zbudować tego intelektualnego tła, w ramach którego tworzy się idea integracji dyscyplin naukowych. Stwierdzenia te dały asumpt do zwrócenia szczególnej uwagi na metodologiczne aspekty zjawiska współdziałania tribologii z naukami przyrodniczymi.

OFERTA TRIBOLOGII DLA NAUK PRZYRODNICZYCH

Tribologia, którą jak wiadomo można ogólnie określić jako naukę o oporach ruchu, ich skutkach i sposobach sterowania nimi, może naukom przyrodniczym zaoferować wiedzę dotyczącą wyzwalania ruchu w biologicznych węzłach ruchowych, eliminowania lub ograniczania powstających w tych węzłach oporów, ograniczania nadmiaru chaotycznego ruchu w układach stanowiących substytuty układów naturalnych (np. w protezach), rozpoznawania (diagnostyki) skutków ruchu w naturalnych i sztucznych układach biologicznych, rozwiązywanie problemów materiałowych w zakresie doboru i użytkowania tworzyw w substytutach układów biologicznych. Najogólniej wiedza ta może służyć do diagnozowania i interpretacji zdarzeń zachodzących podczas ruchu elementów biologicznych węzłów kinematycznych i do rozwiązywania problemów materiałowych w układach w których następuje skojarzenie materiałów sztucznych z naturalnymi obiektami biologicznymi. Można więc powiedzieć, że tribologia może rozwiązywać kwestie interpretacyjne i operacyjne, a w szczególnych przypadkach także badanie *in vitro* naturalnych obiektów biologicznych.

Rozpatrzmy teraz niektóre przykłady zastosowań wiedzy tribologicznej w naukach przyrodniczych.

1. W przyrodzie nie występuje w zwartych układach ruch obrotowy. Więzy jakie istnieją między elementami struktur biologicznych powodują,

że jedyną formą ruchu jako może między nimi występować jest ruch posuwisto-zwrotny, najczęściej po łukach. Z charakteru ruchu posuwisto-zwrotnego wynika, że w krańcowych punktach jakie mają przyjmować przemieszczające się elementy takiego węzła ruchowego prędkość ich przemieszczania równa jest zeru. W punktach tych tarcie jest tarcie statycznym. Z istoty tarcia statycznego można wyprowadzić wniosek, że w punktach tych jest najsilniejsze oddziaływanie adhezyjne między kontaktującymi się powierzchniami elementów węzła biologicznego, jednocześnie w punktach tych występują najmniej korzystne (z punktu widzenia hydrodynamicznej teorii smarowania) warunki tarcia. Można przyjąć więc hipotezę, że uszkodzenia elementów węzłów biologicznych są najbardziej prawdopodobne w tych właśnie punktach.

Jednocześnie można wyprowadzić wniosek, że smarowanie węzłów biologicznych nie może być opisane konsekwencjami wyłącznie jednej z przyjętej w tribologii teorii smarowania. W zależności od sytuacji roboczej w połączeniu, warunki włączają jednocześnie elementy hydrostatyki, hydrodynamiki, elastohydrodynamiki i smarowania granicznego. Wielkie znaczenie ma chemiczne podobieństwo chrząstki stawowej i cieczy synowialnej co pozwala sądzić, że pełniąc funkcje smaru owa ciecz nie może być w żadnych warunkach całkowicie usunięta ze strefy styku. Zawsze znajduje się tam cienka warstwa smaru minimalizująca tarcie powierzchni kości stawowych [L. 2].

Na gruncie kinematyki ruchu połączeń ślizgowych można wytłumaczyć geometrię węzła biologicznego oraz kształt stykających się w nim elementów. Elementami przekazującymi obciążenia są kości, których zakończenia są zaokrąglone, aby zapewniały wystarczającą powierzchnię styku. W niektórych przypadkach główki tych kości mają kształt walcowy (staw kolanowy) [L. 3]. Kształty te i odpowiadające im panewki ograniczają swobodę ruchu połączenia do płaszczyzn, w których odbywa się istotny dla całego organizmu ruch tego połączenia.

2. W naturalnych połączeniach biologicznych problem ograniczenia swobody ruchu rozwiązany jest przez funkcje elementów zabezpieczających stałość struktury takiego połączenia (np. torebki stawowe). W układach sztucznych – protetycznych utrzymanie ruchu w zadanych płaszczyznach jest trudne i zwykle krótkotrwałe. Wynika to z intensywnego, w porównaniu z połączeniami naturalnymi ubytku tworzywa, z którego wykonane jest połączenie, a w konsekwencji z szybko powiększającego się luzu między jego elementami. Zwiększający się luz, zwiększa ilość płaszczyzn,

w jakich może odbywać się ruch elementów połączenia. W efekcie ruch takiego połączenia staje się coraz bardziej chaotyczny. Najbardziej podatne na takie zjawisko są węzły, w których elementy stykające się mają kształt kulisty (lub wycinka powierzchni kuli np. stawy biodrowe), ponieważ w odróżnieniu od innych struktur geometrycznych mają większą swobodę wyboru płaszczyzny ruchu.

Zagadnienie swobody ruchu w układach biologicznych lub ich protezach można rozpatrywać jeszcze w innych aspektach. Dla ich omówienia posłużymy się przykładami.

Przykład 1. Pełne protezy stomatologiczne, które mają zastąpić utracone zęby mają możliwość przemieszczania się po powierzchni dziąsła w zależności od kierunków i wartości sił działających na nie podczas eksploatacji. Przemieszczanie to jest ułatwione także przez to, że ślina stale obecna w jamie ustnej może działać smarująco na układ: proteza – dziąsło. Ruch protezy po powierzchni dziąsła, szczególnie wtedy kiedy rozdziela ją ją cząstki pokarmu jest dla użytkownika protezy dokuczliwy i stresujący. Stąd pojawiły się różne sposoby ograniczania swobody ruchu protezy, z których najprostszym jest przyklejanie protezy do dziąsła.

Przykład 2. Łatwo jest wykazać, że ślimak ma bardzo niekorzystne z punktu widzenia stabilności ruchu położenie środka ciężkości. Jest on położony wysoko i przy nieznacznym wychyleniu poprzecznym jego rzut może wychodzić poza kontur (rzut) poziomy jego nogi. Zgodnie z zasadami statyki ślimak przewracałby się na którąś z bocznych powierzchni. Aby temu zapobiec ślimak wydziela ciecz, która „przykleja” nogę ślimaka do podłoża. Ciecz ta umożliwia ślimakowi przemieszczanie się także w płaszczyźnie pionowej.

Przedstawione przykłady wskazują, że ruch w układach biologicznych jest zorganizowany zarówno pod względem kinematycznym jak i pod względem dynamiki poruszających się obiektów. Zmiana tej organizacji prowadzi do występowania zjawisk patologicznych, leczenie zaś i protetyka polega przede wszystkim na przywróceniu organizacji ruchu do stanu prawidłowego.

3. Kolejnym zagadnieniem, w którym poznawcze i aplikacyjne doświadczenie tribologii może być przydatne naukom przyrodniczym jest kwestia ubytku materiału spowodowana tarciem między stykającymi się warstwami zewnętrznymi elementów węzłów kinematycznych. Zjawisko to w tribologii nazywane jest zużywaniem, a jego skutek – zużyciem.

Tribologia ma w tych kwestiach:

- wiedzę o mechanizmach powstawania zjawiska zużywania, w tym fizyczne i matematyczne modele interpretacyjne,
- metody badania parametrów opisujących intensywność zużywania, definicje i kryteria stanów granicznych węzłów kinematycznych,
- modele prognostyczne zmiany stanów elementów węzłów kinematycznych,
- wiedzę o metodach przeciwdziałania zużyciu oraz o kryteriach doboru materiałów na elementy węzłów kinematycznych.

Wiedza i doświadczenie tribologii mogą mieć zastosowanie w naukach przyrodniczych w następujących sytuacjach związanych z kwestiami materiałowymi:

- w diagnostyce ruchowych węzłów organizmów ludzkich, szczególnie rozpoznawania oporów ruchu, ich przyczyn i prognozowania skutków dla funkcjonowania połączeń kinematycznych,
- w doskonaleniu materiałów na protezy elementów węzłów kinematycznych organizmów ludzkich,
- w badaniach i doskonaleniu materiałów protetyki stomatologicznej, a także materiałów wypełniających ubytki w zębach („plomby”); z tym zagadnieniem związane są badania trwałości plomb oraz stabilności ruchowej układów protetycznych,
- w badaniach kinematycznych i dynamicznych skutków starzenia się połączeń ruchowych w układzie szkieletowym oraz w stawach kończyn górnych i dolnych.

Szczególnym przypadkiem ubytku warstwy zewnętrznej obiektu pod wpływem tarcia jest ścieranie naskórka pod wpływem czynników ścierających obcych wobec organizmu pochodzenia. Zwykle działanie takie jest szkodliwe, ponieważ uszkadza naskórek spełniający wiele ważnych funkcji osłonowych i izolacyjnych. Można wszakże wymienić również terapeutyczne działanie zjawiska ścierania warstw naskórka na przykład w kosmetyce. Przykładem takiego działania jest pasta do zębów, przy czym nie zostało wystarczająco rozstrzygnięte, czy stałe składniki pasty pełnią funkcję ścierania, czy pasta jest środkiem smarującym chroniącym zęby przed zbyt agresywnym działaniem twardych i sztywnych włókien tworzących szczotkę do zębów.

Inną nierozstrzygniętą kwestią jest łączenie substancji naturalnych (rodzimych) z substytutami tworzącymi protezy. Przykładem tego jest łączenie kości udowej z endoprotezą stanu biodrowego. Pozornie nie jest to zagadnie-

nie tribologiczne, warto jednak pamiętać, że od właściwości fizykochemicznych substytutu oraz od obróbki jego warstwy wierzchniej zależy zdolność do łączenia go z obiektem naturalnym i wytrzymałość mechaniczna połączenia.

MOŻLIWOŚĆ WYKORZYSTANIA WIEDZY I DOŚWIADCZENIA PRZYRODNICZEGO W TRIBOLOGII

Przystępując do rozważenia kwestii wykorzystania osiągnięć nauk przyrodniczych w tribologii należy zwrócić uwagę na pewne fakty historyczne. Otóż nauki przyrodnicze są znacznie starsze od tribologii jako wyodrębnionej dyscypliny nauk technicznych. Z tego względu, nauki przyrodnicze stanowiły źródło informacji o metodach badań dla kształtującej się w latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych ubiegłego wieku tribologii. Wiele z tych metod znalazło się już w arsenale badawczym tribologii, znaczna ich część nie została w pełni wykorzystana mimo szybkiego postępu metodycznego jaki został dokonany w tribologii. Nie ma już potrzeby do naśladowania metod planowania doświadczeń i opracowywania wyników eksperymentów, ponieważ w tym względzie tribologia osiągnęła poziom równorzędny i jest całkowicie samodzielna. Nie został dotychczas wykorzystany dorobek nauk przyrodniczych (przede wszystkim biologii) w zakresie systematyzacji, klasyfikacji i typologii.

1. Systematyzacja jest to działanie zmierzające do uporządkowania materiału badawczego (obiektów badań, rezultatów procesu badawczego itp.) według jakiegoś kryterium umożliwiającego poszukiwanie w tym materiale zależności logicznych, a w najprostszym przypadku wiedzy o konkretnych znajdujących się w nim obiektach [L. 4].

Klasyfikacja jest zwykle rozumiana jako wielopoziomowy podział zbioru przedmiotów lub zjawisk na mniejsze działy nazywane klasami [L. 4]. T. Kotarbiński [L. 5] wyróżniał klasyfikację rzeczową i klasyfikację logiczną. Klasyfikacją rzeczową albo segregacją nazwał fizyczne, czyli przestrzenne rozdzielenie przedmiotów pewnej klasy (grupy) na zbiorowości pochodne (podklasy). Klasyfikacją logiczną jest natomiast podział zakresów pojęć (nazw).

Przedmiotem typologii są uporządkowanie jedno – lub wielowymiarowe na podstawowe stopniowości cech. W kolejnych uporządkowanych klasach układa się elementy według miary natężenia jakiejś cechy.

Pojęcia typologiczne w odróżnieniu od klasyfikacji pozwalają formułować zdania o przedmiotach różniących się stopniem nasilenia własności

będących podstawą wyróżnienia typów. Podejście typologiczne pozwala na zbudowanie opisowego wzorca typu, co umożliwia klasyfikację w przypadku braku kryteriów wymiarowych empirycznie (np. przez pomiar wartości jakiejś wielkości fizycznej) [L. 4].

Wymienione metody mogą być przydatne w tribologii przy tworzeniu automatycznych systemów informatycznych nazywanych bankami lub bazami danych. Zasadnicze znaczenie metodologiczne przy organizacji danych ma analogia podstawowych zasad i celów systematyzacji, klasyfikacji i typologii jakie można przyjąć przy tworzeniu baz danych w naukach przyrodniczych i tribologii. Można przewidywać powstanie baz danych o systemach i obiektach, którymi interesuje się tribologia zawierających informacje przydatne w ich projektowaniu, wytwarzaniu i eksploatacji. W chwili obecnej istniejące bazy danych nie obejmują wiedzy o tych systemach takiej, jaką można spotkać w piśmiennictwie.

2. Nauki przyrodnicze wytworzyły ogólne koncepcje interpretacyjne, których zastosowanie nie ogranicza się tylko do przyrody ożywionej. Jedną z nich jest behawioryzm.

Behawioryzm, jak pisze K. Zamiara [L. 6] jest kierunkiem w psychologii określanym mianem „psychologii S-R” tj. psychologii układu bodziec – reakcja. Litera „S” oznacza zespół bodźców kształtowanych przez sytuację zewnętrzną (od angielskiego słowa: stimulus – bodziec), zaś litera „R” oznacza reakcję organizmu na owe bodźce (od angielskiego słowa: reaction – reakcja (lub zachowanie)). Formuła „S-R” streszcza cały program naukowy behawioryzmu. Zaleca ona, aby każde zachowanie się człowieka traktować jako reakcję na określony bodziec, aby dla każdego zachowania się człowieka szukać bodźca, który ją wywołał.

O bodźcach i reakcjach twierdzi się, że mają status fizycznych i dających się obserwować stanów rzeczy. Za determinanty zachowania uznaje się wyłącznie bodźce fizyczne działające w aktualnej sytuacji oraz te, które działały na dany organizm uprzednio. Jeśli pod behawiorystyczne pojęcie „bodziec” podłoży się pojęcie „wymuszenie” lub „oddziaływanie” a przez pojęcie „reakcja” rozumieć się będzie wynik tego oddziaływania można zauważyć wystarczającą analogię pozwalającą na zastosowanie proponowanego ujęcia w tribologii.

Analogię pogłębia założenie, że dla metody badawczej możliwej do zaakceptowania w badaniach behawiorystycznych warunkiem zasadniczym jest jej intersubiektywna dostępność. Koncepcja behawiorystyczna do metod naukowych zalicza tylko metody pozwalające na obiektywne sposoby

uzyskiwania danych empirycznych i także kontrolowanie wiedzy będącej ich wynikiem. Obiektywność metody rozumie się jako jej intersubiektywność, przejawiającą się tym, że może się nią posłużyć dowolny badacz, oraz że w każdym przypadku jej zastosowania uzyskuje się takie same (w granicach dopuszczalnego błędu) rezultaty. Wymagania dotyczące intersubiektywności metody badawczej są w tribologii identyczne.

Założenia behawioryzmu mają dla tribologii wiele ważnych konsekwencji. Jedną z nich jest dopuszczenie dwóch wariantów praw naukowych. W pierwszym wariacie rangę praw naukowych nadaje się jedynie uogólnieniom indukcyjnym tj. ściśle określonym twierdzeniom (w tym także statystycznym), uzyskiwanym przez wnioskowanie indukcyjne z danych empirycznych i w ten sam sposób sprawdzane w doświadczeniu. Stanowią je konstatacje zależności określonego typu reakcji (zmienna zależna) od określonego typu bodźca (zmienna niezależna).

Wariant drugi przyjmuje, że prawem naukowym mogą być zarówno uogólnienia indukcyjne, jak i twierdzenia teoretyczne (zdania sformułowane w kategoriach teoretycznych) nie będące wynikiem wnioskowania indukcyjnego. Zdania te są sprawdzane empirycznie, pośrednio przez testowanie wynikających z nich konsekwencji. Prawa drugiego rodzaju to twierdzenia typu „S-O-R”, w których „O” to termin teoretyczny oznaczający tzw. zmienną pośredniczącą. Konstrukcje takie wyprzedzają praktykę eksperymentalną, stanowiąc dla niej założenia podstawowe.

Wprowadzenie zmiennej pośredniczącej pozwala na rozdzielenie cyklu badawczego „S-R” na etap „S-O” oraz „O-R”. Możliwość taka jest bardzo ważna wtedy, kiedy z przyczyn technicznych nie można podjąć badań bezpośrednio zależności „bodziec – reakcja”.

Behawiorystyczne podejście do badań tribologicznych kryje w sobie wiele innych ciekawych możliwości. Przedstawione zostało jako przykład możliwości adaptacji w tribologii koncepcji metodologicznych i filozoficznych, generowanych w naukach przyrodniczych. Można rozważać takie tribologiczne adaptacje takich teoretycznych ujęć generowanych w naukach przyrodniczych jak ewolucjonizm, determinizm i indeterminizm itp. Być może ich wykorzystanie przyczyni się do sformułowania w tribologii zdań ogólnych, których w dyscyplinie tej jeszcze nadal brakuje.

ZAKOŃCZENIE

Tempo rozwoju nauk przyrodniczych, szczególnie medycznych, a także postęp w nauce o materiałach i procesach technologicznych powodują, że trudno jest przewidywać jakie będą kierunki współdziałania tribologii z tymi naukami. Oto niektóre przykłady najbardziej prawdopodobnych zadań jakie dla aplikacji wiedzy przyrodniczej będzie rozwiązywała tribologia.

1. Badania prowadzone nad bioprądami doprowadzą do powstania sterowanych nimi protez zastępujących utracone lub uszkodzone kończyny. W protezach takich będą stosowane mikroukłady mechaniczne, różnego rodzaju węzły kinematyczne.

W takich układach ważną rolę odgrywać będą: ich funkcjonalność, trwałość i niezawodność. Rozwiązanie związanych z tym problemów będzie wymagało znalezienia odpowiednich materiałów i technologii ich obróbki oraz zapewnienia ich samosmarności, przy zapewnieniu ich wieloletniej trwałości.

Zagadnienia te są w pewnym sensie zbliżone do budowania urządzeń mechanicznych w systemach informatycznych.

2. Można spodziewać się także wykorzystania atrybutów tarcia (przede wszystkim oporu ruchu) w urządzeniach rehabilitacyjnych. Tarcie może być czynnikiem obciążającym w takich urządzeniach, przy czym możliwość sterowania siłą tarcia daje możliwość płynnej regulacji takiego obciążenia i różnicowania go w zależności od potrzeb rehabilitacyjnych w odniesieniu do różnych faz terapii, poszczególnych kończyn, a nawet ich elementów.

3. Rozwijająca się reologia środków smarowych i cieczy chłodząco-smarujących pozwala na coraz lepszy opis zjawisk zachodzących podczas eksploatacji tych substancji. Analogia między właściwościami reologicznymi materiałów eksploatacyjnych a takimiż właściwościami cieczy występujących w organizmach żywych daje możliwość interpretacji tych drugich na podstawie wiedzy o wspólnych modelach reologicznych (np. krew i smary maziste opisywane są tym samym modelem Cassona).

Wymienione tu przykłady ewentualnego rozwoju współdziałania między tribologią a naukami przyrodniczymi nie wyczerpują (jak należy sądzić) wszystkich potencjalnych możliwości poznawczych i aplikacyjnych kontaktów między tymi naukami. Rozwój ten zależy jednak od wzajemnego poznania problemów badawczych i aplikacyjnych przez obie strony ewentualnego partnerstwa.

LITERATURA

1. Leszek W.: Procesy dyferencjacji i integracji wiedzy tribologicznej. Tribologia Nr 3/2003.
2. Manzijj S.F., Mel'nik K.J., Klykov V.I.: Matematicheskoe modelirovanie nazrevshijj etap v izuchenii organov dvizhenija pozvonochnykh. Matematicheskie metody v biologii. „Naukova Dumka”, Kijiw 1977.
3. Mur D.: Osnovy i primenenija triboniki. Wyd. „Mir”, Moskva 1978.
4. Leszek W.: Nieempiryczne procedury badawcze w naukach przyrodniczych i technicznych. Wyd. ITE, Radom 1999.
5. Kotarbiński T.: Elementy teorii poznania, logiki formalnej i metodologii nauk. Ossolineum, Wrocław 1961.
6. Zamiara K.: Behawioryzm. [w:] Filozofia a nauka. Zarys encyklopedyczny. Ossolineum, Wrocław 1987.

Summary

Some problems of cooperation among tribology and biological science are presented in the paper. First part of paper concern interpretation possibility of tribology in selected problems of nature arid medicine. In the second part of article are described the use of biological science research methods in tribological problems.

Anna MATUSZEWSKA*, Marian GRĄDKOWSKI*

**BADANIE ROLI DODATKÓW AW/EP
W PRZEMIANACH WARSTWY WIERZCHNIEJ
PRZY OBCIĄŻENIU ZACIERAJĄCYM**

**THE INFLUENCE OF AW/EP ADDITIVES ON THE
SURFACE LAYER CHANGES UNDER SCUFFING LOAD**

Słowa kluczowe:

smarowanie, dodatki AW/EP, warstwa graniczna, warstwa wierzchnia

Key words:

lubrication, AW/EP additives, boundary layer, surface layer

Streszczenie

Badano przemiany warstwy wierzchniej roboczych powierzchni węzła tarcia, smarowanych kompozycjami mineralnego oleju bazowego z dodatkami AW/EP. Testy tribologiczne przeprowadzono za pomocą aparatu czterokulowego przy liniowym przyroście obciążenia, przerywając biegi przy obciążeniu zacierającym oraz o 400 N niższym i wyższym od zacierającego. Stan warstwy wierzchniej badano za pomocą mikrospektrofotometrii

* Instytut Technologii Eksploatacji w radomiu, ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, tel. (048) 36-442-41.

w podczerwieni oraz skaningowej mikroskopii elektronowej sprzężonej z mikroanalizą rentgenowską z dyspersją energii oraz rentgenowskiej spektroskopii fotoelektronów. Stwierdzono, że przemiany tribochemiczne składników środka smarowego zachodzą zanim zostanie osiągnięte obciążenie zacierające. W ich wyniku, na powierzchni tarcia powstają produkty, zdolne do ochrony powierzchni. W trakcie zacierania warstwy te są usuwane a warstwa wierzchnia ulega radykalnej przebudowie. Istotną rolę w tych procesach odgrywa tlen i węgiel.

WPROWADZENIE

W technice, w celu zmniejszenia oporów ruchu dąży się do zamiany tarcia zewnętrznego ciał stałych na tarcie wewnętrzne cieczy – środka smarowego [L. 1]. Najbardziej pożądane jest pełne rozdzielenie trących powierzchni z pomocą filmu smarowego, tzw. smarowanie hydrodynamiczne (HD). Przy małych prędkościach ruchu lub wysokich obciążeniach może dochodzić do kontaktu występow nierówności. W takich warunkach występuje smarowanie elastohydrodynamiczne (EHD) [L. 2], charakteryzujące się tym, że część obciążenia normalnego jest przenoszona przez film smarowy a część przez występy powierzchni. Zazwyczaj przyjmuje się, że przy smarowaniu EHD (podobnie jak HD) brak jest zużywania [L. 3] i nie zachodzą reakcje tribochemiczne [L. 4]. Jednak ciepło wydzielane w wyniku powstawania i niszczenia szpiców adhezyjnych może inicjować reakcje chemiczne pomiędzy składnikami środka smarowego a powierzchnią tarcia. Zjawisko to jest charakterystyczne dla smarowania granicznego [L. 4, 5]. W warunkach rzeczywistych najczęściej występuje smarowanie mieszane. Ze względu na złożoność towarzyszących mu zjawisk jest ono najmniej opisane [L. 6, 7].

W celu poprawy właściwości smarnych oleju bazowego wprowadza się do niego dodatki przeciwzużyciowe (AW) i przeciwzatarciowe (EP). Większość stosowanych dodatków AW/EP opartych jest na organicznych związkach siarki i fosforu, rzadziej chloru lub azotu [L. 1, 5, 8, 9]. Związki te przy odpowiednio wysokich obciążeniach i temperaturach uaktywniają się i wchodzi w reakcję z warstwą wierzchnią elementów tarcia, modyfikując ją i zmniejszając opory ruchu. Przyjmuje się, że związki fosforu odpowiedzialne są za redukcję tarcia i zużycia przy niższych obciążeniach wężła, zaś związki siarki – w warunkach ekstremalnych [L. 10, 11]. Celem pracy było zbadanie przemian dodatków triboaktywnych w warunkach

obciążeń bliskich zacierającemu i wpływu tych procesów na budowę chemiczną warstwy wierzchniej.

METODYKA BADAŃ

Badania tribologiczne przeprowadzono za pomocą aparatu czterokulowego T-02, prod. ITeE w Radomiu, umożliwiającego prowadzenie testu przy liniowym wzroście obciążenia węzłą [L. 12]. Elementy testowe stanowiły kulki wykonane ze stali łożyskowej $\leq H15$. Biegi testowe przerywano w chwili osiągnięcia obciążenia zacierającego (P_c) lub przy obciążeniach niższym i wyższym o około 400 N od zacierającego. Jako środka smarowego używano 0,5; 1,0; 2,0; 5,0 i 7,5% wag. kompozycji oleju bazowego SN 400 z dodatkiem opartym na dialkilotiofosforanie cynku – oznaczonym symbolem D2 lub organicznych związkach siarki i fosfor – D3 (symbolika stosowana we wcześniejszych pracach [L. 13, 14]). Po testach badano stan warstwy wierzchniej śladów tarcia za pomocą mikrospektrofotometrii w podczerwieni (FTIRM) oraz skaningowej mikroskopii elektroновой sprzężonej z mikroanalizą rentgenowską z dyspersją energii (SEM/EDS). Wybrany element testowy poddano także badaniu metodą rentgenowskiej spektroskopii fotoelektronów (XPS).

WYNIKI BADAŃ I DISKUSJA

Efektywność przeciwzużyciową poszczególnych kompozycji oceniano na podstawie wielkości śladów tarcia. Wyniki pomiarów (średnie dla co najmniej trzech biegów wolnych od błędów grubych) zestawiono w **Tab. 1**.

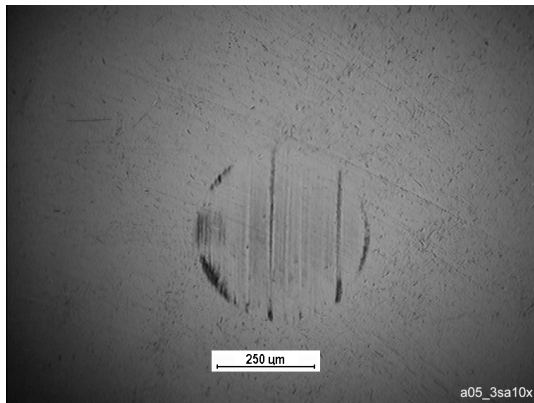
Jak wynika z danych **Tabeli 1**, różnicowanie efektywności dodatków obserwuje się dopiero przy obciążeniu zacierającym, a szczególnie po jego przekroczeniu. Wtedy także daje się zaobserwować wpływ stężenia dodatku w oleju bazowym na wielkość zużycia kulki.

Tabela 1. Zależność średnicy śladu od warunków tarcia oraz rodzaju i stężenia dodatku w oleju bazowym SN 400

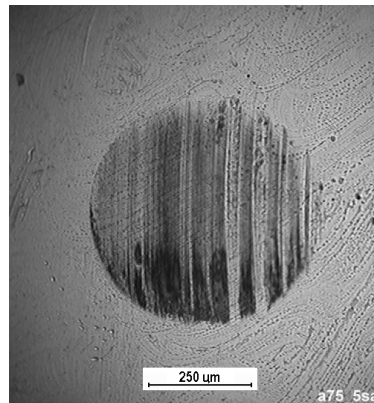
Table 1. The dependence of contact zone diameter on the friction conditions, kind of additive and additive concentration in lubricant

Dodatek D2			Dodatek D3		
Stężenia, [%] wag.	Obciążenie	Średnica śladu, [mm]	Stężenia, [%] wag.	Obciążenie	Średnica śladu, [mm]
0,5	$P_t - 400\text{ N}$	0,46	0,5	$P_t - 400\text{ N}$	0,44
0,5	P_t	0,79	0,5	P_t	0,57
0,5	$P_t + 400\text{ N}$	1,17	0,5	$P_t + 400\text{ N}$	0,87
1,0	$P_t - 400\text{ N}$	0,51	1,0	$P_t - 400\text{ N}$	0,49
1,0	P_t	0,74	1,0	P_t	0,62
1,0	$P_t + 400\text{ N}$	1,13	1,0	$P_t + 400\text{ N}$	0,86
2,0	$P_t - 400\text{ N}$	0,50	2,0	$P_t - 400\text{ N}$	0,48
2,0	P_t	0,57	2,0	P_t	0,61
2,0	$P_t + 400\text{ N}$	1,44	2,0	$P_t + 400\text{ N}$	0,75
2,0	$P_t - 400\text{ N}$	0,53	2,0	$P_t - 400\text{ N}$	0,48
2,0	P_t	0,92	2,0	P_t	0,60
2,0	$P_t + 400\text{ N}$	1,52	2,0	$P_t + 400\text{ N}$	0,66
7,5	$P_t - 400\text{ N}$	0,53	7,5	$P_t - 400\text{ N}$	0,53
7,5	P_t	0,94	7,5	P_t	0,60
7,5	$P_t + 400\text{ N}$	1,17	7,5	$P_t + 400\text{ N}$	0,69

a)



b)



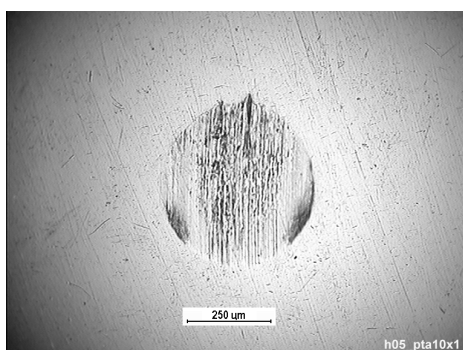
Rys. 1. Obrazy optyczne śladów powstających na powierzchni kontaktu kulek testowych przed osiągnięciem obciążenia zacierającego przy smarowaniu olejem zawierającym: a) 0,5% D2, b) 7,5% D2

Fig. 1. Images of contact zone obtained before scuffing load for balls lubricated with oil compositions with a) 0,5% D2, b) 7,5% D2

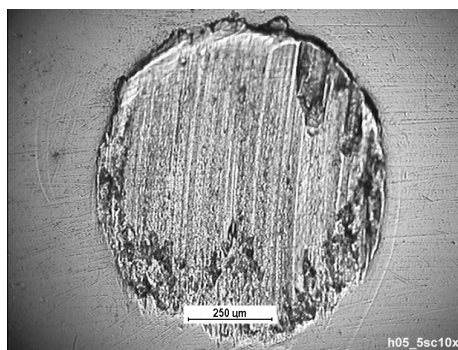
Ślady powstające na powierzchni kulek przed osiągnięciem obciążenia zacierającego (**Rys. 1** – obrazy śladów w świetle widzialnym – mikroskopia optyczna) wykazują pewne charakterystyczne cechy. Stanowią je ciemne smugi, układające się zgodnie z kierunkiem tarcia, przy czym są one bardziej intensywne w strefie wejściowej styku. Wyrazistość śladów rośnie wraz ze wzrostem stężenia dodatku. Badania profilograficzne wykazały brak zużycia na powierzchniach objętych tymi śladami. Wskazuje to, że stanowią je zdeponowane pochodne tribochemicznych przekształceń składników środka smarowego.

Wyraźne ślady zużycia pojawiają się na powierzchni tarcia po przekroczeniu obciążenia zacierającego – **Rys. 2**. Najpierw zużycie pojawia się w pasie środkowym strefy styku, a więc zgodnie z układem naprężeń, i stopniowo obejmuje całą powierzchnię kontaktu. Na **Rys. 2a** przedstawiono ślad powstający na kulce przy osiągnięciu obciążenia zacierającego, zaś na **Rys. 2b** po osiągnięciu obciążenie większego o 400 N od P_t . Ten ostatni obrazuje typowe zużycie powierzchni tarcia. Zaobserwowana w części przypadków redukcja wielkości śladów zużycia wraz ze wzrostem stężenia dodatku nie zawsze występuje. Wynika to prawdopodobnie z faktu, że uzyskanie równowagi pomiędzy niszczeniem i odtwarzaniem zmodyfikowanej warstwy wierzchniej, związane z pełnym uaktywnieniem dodatku, wymaga pewnego czasu. Zaś czas ten jest uzależniony od rodzaju i stężenia dodatku.

a)



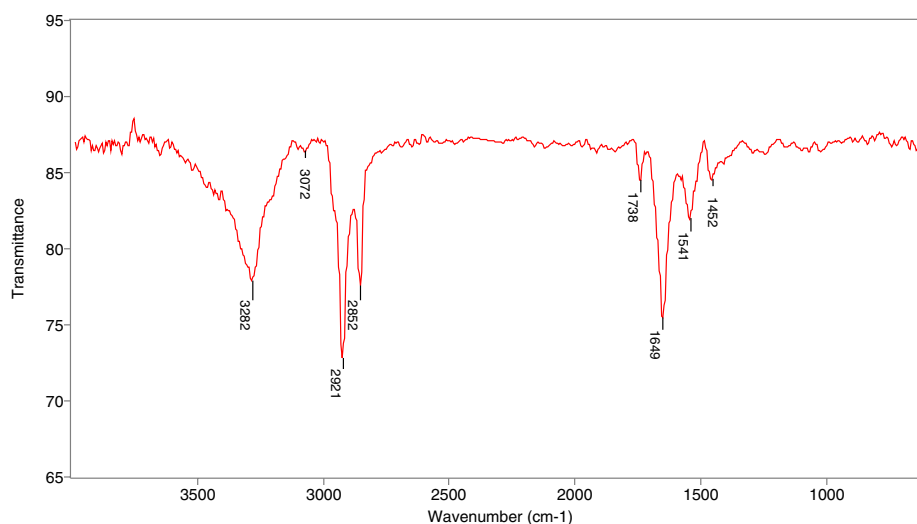
b)



Rys. 2. Ślad tarcia powstały na kulce smarowanej olejem zawierającym 0,5% dodatku D3: a) w P_t , b) po przekroczeniu P_t

Fig. 2. Images of wear scar on the balls obtained for oil compositions with 0,5% content of D2 additive a) at scuffing load, b) after exceeding of scuffing load

Badania za pomocą FTIRM powierzchni śladów, powstających na kulkach testowych wykazały obecność w nich związków organicznych jedynie przed osiągnięciem obciążenia zacierającego. Na **Rys. 3** przedstawiono przykładowe widmo IR, charakterystyczne dla związków organicznych, zaadsorbowanych w śladach tarcia. Wszystkie widma IR, niezależnie od rodzaju i stężenia dodatku w oleju, miały identyczny charakter. Szczegółowa analiza widm IR nie wykazała obecności wyjściowych dodatków w warstwach substancji organicznych. Może to być wynikiem „przykrycia” ich pasm absorpcji absorpcją bazy olejowej lub przekształceniem dodatków w ich organiczne i nieorganiczne pochodne. Widmo IR wskazuje jednak na dominację w warstwie wierzchniej związków karbonylowych, a także soli kwasów karboksylowych i związków nienasyconych.

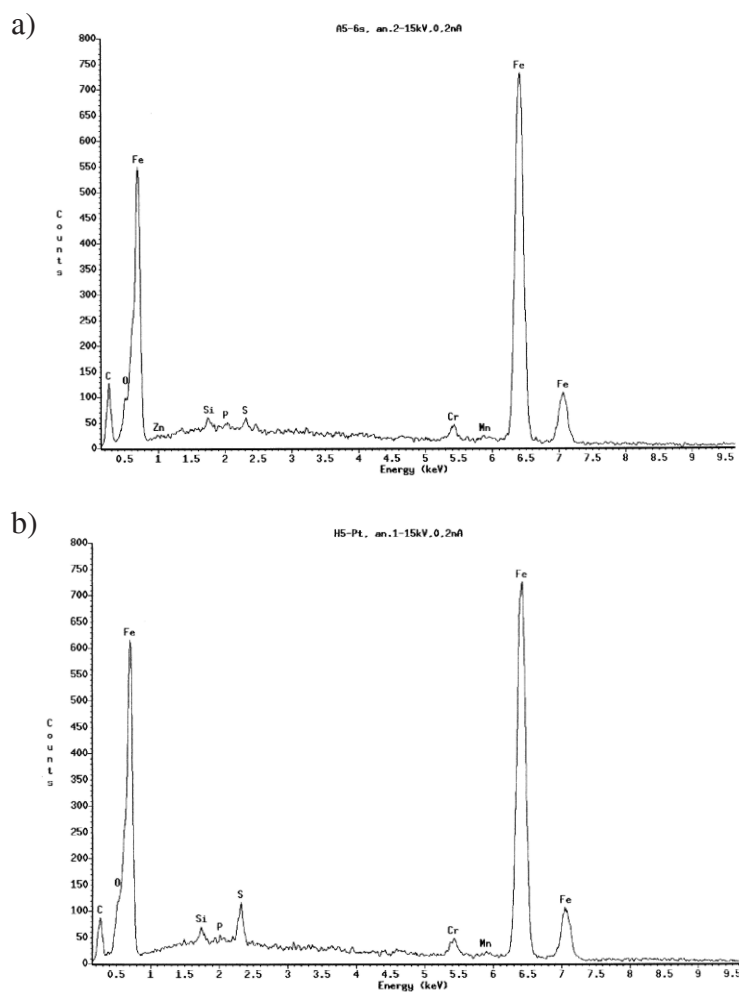


Rys. 3. Widmo IR charakterystyczne dla produktów odłożonych w śladzie tarcia przed przerwaniem filmu smarowego

Fig. 3. IR spectrum of organic products at contact zone before breaking down of lubricating film

Wobec braku substancji organicznych w śladach tarcia po osiągnięciu i przekroczeniu obciążenia zacierającego dalsze badania powierzchni prowadzono za pomocą SEM/EDS. Badaniom poddano ślady powstałe po testach przy zastosowaniu środka smarowego zawierającego 0,5 i 5,0% do-

datków D2 i D3. Na **Rys. 4** przedstawiono przykładowe widma EDS uzyskane ze śladów tarcia, powstałych przy obciążeniu zacierającym. Analiza widm EDS uzyskanych ze śladów tarcia, powstałych przed osiągnięciem P_t wykazała, że wzrostowi stężenia dodatku w oleju towarzyszy zwiększenie ilości pierwiastków aktywnych w śladzie. Potwierdza to wcześniejsze przypuszczenia, że ciemne smugi na powierzchni kulki są produktami pro-

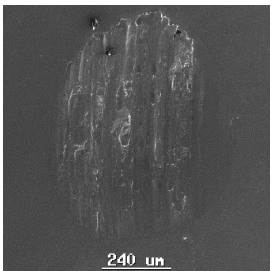
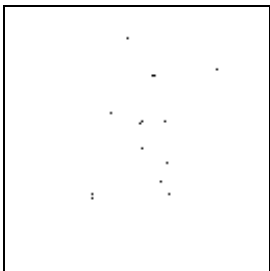
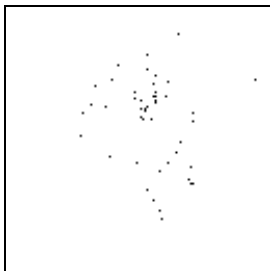
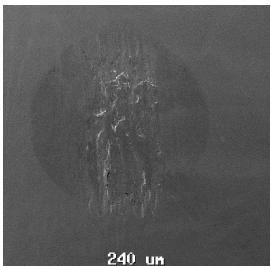
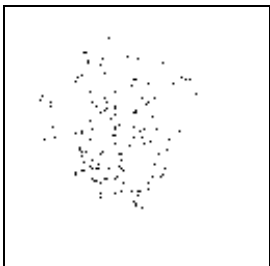
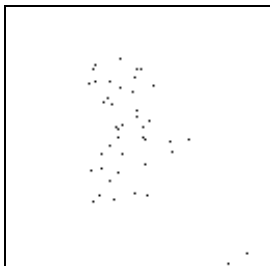


Rys. 4. Widma EDS uzyskane ze śladów tarcia powstałych pod obciążeniem zacierającym dla kompozycji oleju SN 400 z: a) 5% D2, b) 5% D3

Fig. 4. EDS spectra obtained at scuffing load for balls lubricated with oil compositions with: a) 5% D2, b) 5% D3

cesów tribochemicznych. Istotnym stwierdzeniem jest to, że wzrost stężenia dodatku powodował intensyfikację sygnału charakterystycznego dla tlenu. Wskazuje to, że tlen i związki tlenowe odgrywają istotną rolę w tworzeniu warstw ochronnych na powierzchniach tarcia, nawet w obecności tzw. pierwiastków triboaktywnych – siarki i fosforu.

Po osiągnięciu obciążenia zacierającego następuje znaczący wzrost udziału węgla w warstwie wierzchniej strefy tarcia. Zjawisko to można tłumaczyć między innymi przemianami węglowodorów podczas tarcia prowadzącymi aż do powstawania węglików metali [L. 15]. Nie towarzyszy temu jednak wzrost udziału siarki i fosforu w tej warstwie przy smarowaniu węzła z zastosowaniem dodatku D2. Natomiast w obecności dodatku D3 rośnie udział tych pierwiastków w warstwie wierzchniej wraz ze wzrostem obciążenia węzła tarcia. Różnice w sposobie oddziaływania obu kom-

SN 400 + 5% D2		
Obraz SEM	Rozkład S	Rozkład O
		
SN 400 + 5% D3		
Obraz SEM	Rozkład S	Rozkład C
		

Rys. 5. Obrazy SEM i mapy rozkładu pierwiastków w śladach tarcia powstałych przy obciążeniu zacierającym przy smarowaniu olejem zawierającym 5% D2 lub D3

Fig. 5. SEM images of wear scar and elements distribution in the wear-scar surface for 5% concentration of D2 or D3 additives

pozycji smarowych wynikają prawdopodobnie z ich odmiennego składu chemicznego. Dodatek D2 charakteryzuje się mniejszą sumaryczną zawartością pierwiastków aktywnych (14,5% wag. S, 6,8% wag. P) w stosunku do D3 (39,7% wag. S i 0,75% wag. P). Prawdopodobnie warstwy graniczne utworzone z udziałem D2 są cieńsze oraz mniej trwałe i są usuwane podczas zacierania. Powyższe spostrzeżenia potwierdzają także mapy gęstości rozkładu poszczególnych pierwiastków w śladach tarcia zaprezentowane na **Rys. 5**.

W przypadku dodatku D2 zarejestrowanie map rozkładu siarki i tlenu możliwe było jedynie dla śladu powstającego przy obciążeniu zacierającym. Natomiast dla dodatku D3 obecność siarki stwierdzano w różnych fazach procesu tarcia. Znaczne różnice składu chemicznego warstwy wierzchniej znajdują odzwierciedlenie także w strukturze powierzchni tarcia, kształtowanej przy obciążeniu zacierającym. Przy smarowaniu węzła tarcia olejem zawierającym dodatek D2 zachodzi większa deformacja plastyczna powierzchni, niż w obecności dodatku D3. Świadczy to o niższej odporności warstwy wierzchniej, kształtowanej w obecności dodatku D2.

Ślad zużycia po teście, w którym jako środek smarny stosowano 0,5%-ową kompozycję SN 400 z D2 poddano badaniom metodą XPS. W wyniku analizy widm XPS stwierdzono obecność cynku i fosforu (z dodatku) na powierzchni tarcia. Ponadto występuje w nim także tlen i węgiel w ilościach kilkakrotnie większych niż poza śladem tarcia. Nie stwierdzono natomiast obecności siarki. Może to wskazywać, że warstwy związków siarki zostały usunięte z powierzchni tarcia w fazie zacierania. Usunięcie warstwy wierzchniej w wyniku trawienia jonowego wykazało, że pierwiastki charakterystyczne dla dodatku – poza węglem – ułożone są jedynie w niej. W miarę usuwania kolejnych warstw stwierdzono spadek zawartości węgla lecz jego ilość była wyższa niż poza śladem tarcia. Podobnie jak w przypadku węgla, w kolejnych warstwach materiału zmniejszała się także zawartość tlenu. Badanie struktury widm XPS w pasmach charakterystycznych dla żelaza, chromu i manganu wskazało, że w warstwach, w których obecny jest tlen, metale te występują zarówno w postaci wolnej jak i tlenków.

W oparciu o dane uzyskane metodami SEM/EDS, FTIRM oraz XPS można wnioskować, że powierzchnie tarcia były chronione nie tylko przez warstwy utworzone z udziałem pierwiastków triboaktywnych, pochodzących z dodatku, ale także przez związki tlenu i węgla, będące pochodnymi utleniania i przemian składników bazy olejowej i dodatku. Tlen i węgiel

migrują w głąb materiału z powierzchni tarcia i reagują ze składnikami stali w wyniku czego w głębszych warstwach powstają tlenki i węgliki metali, wchodzących w skład stali. Natomiast triboaktywne składniki dodatków, takie jak siarka i fosfor modyfikują warstwę wierzchnią sprzyjając dyssypacji energii tarcia. Fakty te wskazują na kluczową rolę tlenu i węgla w kształtowaniu właściwości powierzchni tarcia, nawet w obecności typowych pierwiastków triboaktywnych.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że związki wchodzące w skład środków smarowych ulegają przemianom tribochemicznym na skutek tarcia, modyfikując powierzchnie tarcia w wyniku reakcji ze składnikami stali. Modyfikacja powierzchni w strefie styku następuje jeszcze przed osiągnięciem obciążenia zacierającego. Polega ona na wytworzeniu na powierzchni warstwy składającej się z mieszaniny substancji organicznych i nieorganicznych, będących pochodnymi pierwiastków aktywnych z dodatku smarnego oraz produktów oksydacji węglowodorów wchodzących w skład środka smarowego. Prawdopodobnie tej warstwie można przypisać ochronę węzła w fazie smarowania HD i EHD. Wzrost stężenia tlenu w warstwie wierzchniej wraz ze zwiększeniem stężenia dodatku triboaktywnego, świadczy o istotnym udziale tlenu w kształtowaniu warstw ochronnych na powierzchni tarcia. Można przypuszczać, że tlen i jego związki są prekursorami tribochemicznych przemian warstwy wierzchniej. Stwierdzono także, że w momencie osiągnięcia obciążenia zacierającego (przerwanie filmu smarowego) gwałtownie rośnie udział węgla w warstwie wierzchniej. Świadczy to o jego istotnym udziale w modyfikacji warstwy wierzchniej.

LITERATURA

1. Kałdoński T.: Tribologia i płyny eksploatacyjne. Cz. 1. Wybrane problemy tribologii. WAT, Warszawa 1995.
2. Dowson D., Higginson G. R.: A numerical solution to the elastohydrodynamic problem. *Journal of Mechanical Engineering Science* 1959, **1** (1), 6–15.
3. Nosal S.: Tribologiczne aspekty zacierania węzłów ślizgowych. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 1998.
4. Bhushan B. (red.): *Modern Tribology Handbook. Vol. I, Principles of Tribology*. CRC Press, Boca Raton, London, New York, Washington 2001.

5. Chichinadze A. V. (red.): *Osnovy tribologii (trenie, iznos, smazka)*. Nauka i Tekhnika, Moskva 1995.
6. Guangteng G., Spikes H. A.: Boundary Film Formation by Lubricant Base Fluids. *Tribology Transaction* 1996, 39 (2), 448–454.
7. Spikes H. A., Olver A. V.: Basics of Mixed Lubrication. *Materiały konferencyjne: 13th International Colloquium Tribology*, Esslingen 2002, 19–29.
8. Liston T. V.: Engine lubricant additives, what they are and how they function. *Lubrication Engineering* 1992, vol. 48, nr 5, 389–397.
9. Khorramian B. A., Iyer G. R., Kodali S., Natarajan P., Tupil R.: Review of antiwear additives for crankcase oils. *Wear* 1993, vol. 169, 87–95.
10. Stachowiak G. W., Batchelor A. W.: *Engineering tribology*. Elsevier, London, New York, Tokyo, Amsterdam 1993.
11. Torrance A. A., Morgan J. E., Wan G. T. Y.: An additive's influence on the pitting and wear of ball bearing steel. *Wear* 1996, vol. 192, 66–73.
12. Piekoszewski W., Szczerek M., Tuszyński W.: Method for Scuffing Propagation Assessment. *Tribotest Journal* 2001, 7–3, 219–227.
13. Matuszewska A., Grądkowski M., Szczerek M.: Wpływ aktywnych pierwiastków w dodatkach AW/EP na trwałość warstwy granicznej i wierzchniej. *Tribologia* 2002, 2, 447–460.
14. Matuszewska A., Grądkowski M.: Oddziaływanie dodatków typu AW/EP na wybrane właściwości systemu tribologicznego. *Przyjęty do druku w 1/2003 Problemów Eksploatacji*.
15. Makowska M.: *Badanie tribochemicznych przemian węglowodorów alifatycznych w warunkach tarcia (rozprawa doktorska)*. Uniwersytet Łódzki, Wydział Fizyki i Chemii, Łódź 2001.

Recenzent:
Witold PIEKOSZEWSKI

Summary

The authors investigated the influence of AW/EP additive compositions in mineral base oil on the changes of a surface layer under scuffing conditions. The tribological tests were carried out with the use of four-ball extreme-pressure tester employing a method with continuously increasing of load. The runs have been stopped at scuffing load (P_s) and at loads about 400 N higher and lower from P_s . The analyses of surface were performed with the use of IR microspectrophotometry, scanning electron microscopy with energy dispersion spectrometry and X-ray photoelectron spectroscopy. It has been stated that the

tribochemical reactions of steel surface and lubricant proceed at loads lower from a scuffing load. The protective layers are formed on the surface layer as a result of these reactions. The protective layers are removed during scuffing and surface layer undergoes a radical change at contact zone. The oxygen and carbon plays an important role in these processes.

**Remigiusz MICHALCZEWSKI*, Witold PIEKOSZEWSKI*,
Marian SZCZEREK***

**WPLYW DODATKÓW TYPU AW/EP
NA POWIERZCHNIOWĄ TRWAŁOŚĆ
ZMĘCZENIOWĄ ELEMENTÓW Z POWŁOKĄ TiN**

**THE EFFECT OF AW/EP ADDITIVES ON ROLLING
CONTACT FATIGUE OF TiN COATED PARTS**

Słowa kluczowe:

pitting, powierzchniowa trwałość zmęczeniowa, dodatki typu AW/EP, powłoka TiN

Keywords

pitting, rolling contact fatigue, AW/EP additives, TiN coating

Streszczenie

W wyniku naniesienia na elementy trące twardej, cienkiej powłoki TiN uzyskiwany wzrost odporności na zacieranie wężła tarcia wiąże się z niebezpieczeństwem zmniejszenia jego powierzchniowej trwałości zmęczeniowej.

* Instytut Technologii Eksploatacji w radomiu, ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, tel. (048) 36-442-41.

niowej, czyli skrócenia czasu do wystąpienia formy zużywania zwanej pittingiem.

W pracy przedstawione zostały wyniki badań powierzchniowej trwałości zmęczeniowej elementów z powłoką TiN przeprowadzone zgonie z normą IP 300/82. Węzeł tarcia smarowano olejami zawierającymi pakiety dodatków typu AW lub EP.

Ślady tarcia poddano obserwacji z użyciem skaningowego mikroskopu elektronowego oraz mikroskopii optycznej. Przeprowadzono analizę składu warstwy wierzchniej techniką EDS.

Z przeprowadzonych badań tribologicznych wynika, że dodatki smarnościowe typu AW i EP mogą powodować wzrost powierzchniowej trwałości zmęczeniowej elementów pokrytych powłoką TiN.

WPROWADZENIE

Wysokoobciążone elementy maszyn narażone są szczególnie na dwie formy zużywania o dużej intensywności. Są to zacieranie oraz powierzchniowe zużycie zmęczeniowe – pitting. Jedną z możliwości zwiększenia odporności na zacieranie wysokoobciążonych węzłów tarcia jest stosowanie olejów z dodatkami smarnościowymi typu AW (przeciwzużyciowe) lub EP (przeciwzatarciowe). Wzrost odporności na zacieranie węzła tarcia możliwy jest także poprzez technologiczną modyfikację warstwy wierzchniej elementów trących, np. przez pokrycie ich twardą, cienką powłoką. Obserwowana w ostatnich latach tendencja rozwoju technik otrzymywania powłok przeciwzużyciowych wskazuje, że największe możliwości stwarzają metody fizycznego osadzania z fazy gazowej z udziałem plazmy (PAPVD – Plasma Assisted Physical Vapour Deposition). Redukcja zużycia w tym przypadku wynika ze zmniejszenia powinowactwa materiałów warstw wierzchnich współpracujących elementów, a przez to ograniczenia skłonności do szczepień adhezyjnych. Modyfikacja ta pozwalająca na wzrost odporności na zacieranie węzła tarcia [L. 1÷5], wiąże się z niebezpieczeństwem zmniejszenia powierzchniowej odporności zmęczeniowej czyli skróceniem czasu do wystąpienia pittingu.

W literaturze dotyczącej tematu znajdujemy doniesienia wskazujące na możliwość zachowania, a nawet zwiększenia odporności na pitting elementów w wyniku pokrycia ich cienkimi, twardymi powłokami [L. 6÷12]. Praktycznie pomijany, ale nie bez znaczenia jest wpływ rodzaju środka smarowego na powierzchniową trwałość zmęczeniową elementów z po-

włokami. Do smarowania wysokoobciążonych stalowych węzłów tarcia (kół zębatach, łożysk) stosuje się oleje smarowych z pakietem dodatków przeciwzużyciowych (AW) oraz przeciwzatarciowych (EP). Ich wpływ na pitting elementów stalowych zależy od rodzaju i stężenia dodatków [L. 13]. Stanowi to poważne ograniczenie w praktycznej aplikacji powłoki TiN na elementy trące części maszyn.

OBIEKTY I METODY BADAŃ

Jako olej bazowy do smarowania węzła tarcia zastosowano mineralny olej referencyjny bez dodatków smarnościowych RL-144/4 [L. 1]. Do badania wpływu dodatków smarnościowych wybrano pakiet dodatków przeciwzużyciowych AW (zawierający metaloorganiczne związki zawierające cynk, siarkę i fosfor) oraz pakiet dodatków przeciwzatarciowych EP (na bazie związków siarkowo-fosforowych). Przygotowano kompozycje oleju referencyjnego z 3% dodatkiem AW i 5% dodatkiem EP.

Trwałość zmęczeniową elementów stalowych z powłoką TiN charakteryzowano za pomocą tzw. trwałości 10% i 50% oznaczonych L_{10} i L_{50} . Jest to czas eksploatacji tocznych węzłów tarcia (smarowanych badanym olejem), w którym odpowiednio 10% lub 50% ich populacji ulega uszkodzeniu.

Elementami testowymi były kulki łożyskowe o średnicy nominalnej 1/2", wykonywane ze stali łożyskowej ŁH15 w klasie dokładności 16 według PN-83/M-86452. Chropowatość powierzchni przed procesem osadzania powłoki TiN charakteryzowana parametrem R_a wynosiła 0,032 μm , a twardość 60÷65 HRC.

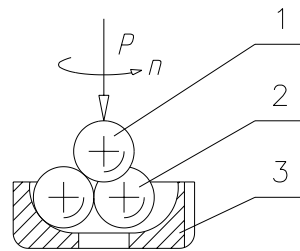
Powłokę TiN grubości ok. 2,0^{+0,25} μm , osadzono na stalowych elementach testowych w procesie PVD, metoda łukowo-próżniowa¹. Proces osadzania został przeprowadzony poniżej temperatury wystąpienia przemian w materiale podłoża (poniżej 200°C).

Badanie trwałości przeprowadzono z użyciem zmodernizowanego aparatu czterokulowego T-03 produkcji ITeE.

Badanie polega na przeprowadzeniu, przy stałym zadany obciążeniu i stałej prędkości obrotowej biegu czterech stalowych kulek współpracujących tocznie (**Rys. 1**) w obecności środka smarowego, przy czym kul-

¹ Proces wykonano za pomocą urządzenia MZ 383 w Zakładzie Technologii Warstwy Wierzchniej Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu

ka górna pokryta była powłoką TiN, natomiast dolne były bez powłoki. Rejestrowano sygnał charakteryzujący poziom drgań generowanych w badanym węźle. Badania kończyły się automatycznie – z chwilą przekroczenia przez węzeł tarcia dopuszczalnego wzrostu poziomu drgań wywołanych powstaniem na powierzchni jednej z kul wykruszenia zmęczeniowego (pittingu).



Rys. 1. Schemat węzła tarcia zmodernizowanego aparatu czterokulowego: 1-kulka górna, 2-kulki dolne, 3-bieżnia

Fig.1. Schematic diagram of modified four-ball tribosystem: 1-upper ball, 2-lower balls, 3- ball race

Badanie przeprowadzono dla stałych warunków zgodnie z normą IP 300/82:

- prędkość obrotowa wrzeciona: 1450 ± 50 obr/min,
- obciążenie wstępne węzła: 981 N (100 kg),
- obciążenie węzła: 3924 N (400 kg),
- temperatura otoczenia: $20 \pm 5^\circ\text{C}$,
- sposób czyszczenia kulek: mycie w benzynie ekstrakcyjnej.

Badania kontynuowano do osiągnięcia dla danego środka smarowego 24 pozytywnych biegów, tj. takich, które zakończone zostały wystąpieniem pittingu na kulce górnej i notowano ich czasy. Do każdego biegu używano 4 nowe kulki, świeżą próbkę badanego środka smarowego oraz nieuszkodzoną bieżnię, której stan analizowano za pomocą lupy lub mikroskopu optycznego.

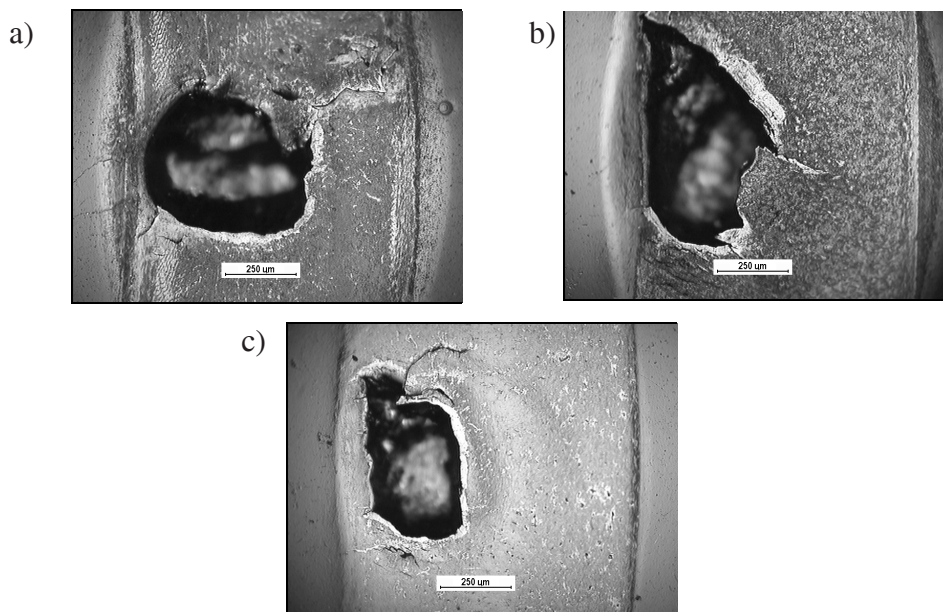
Wyniki przedstawiono w formie wykresów Weibulla sporządzanego według procedur podanych w normie IP 300/82. Z wykresu odczytywano wskaźniki L_{10} i L_{50} .

Do analizy śladu tarcia zastosowano mikroskopu optycznego MM-40/L3FA (firmy Nikon) wraz z systemem akwizycji i analizy cyfrowej obrazu MultiScan.

Obserwacje mikroskopowe prowadzono z użyciem skaningowego mikroskopu elektronowego S-2460N (firmy Hitachi) wraz z mikroanalizatorem rentgenowskim Voyager 3050 (produkcji Noran Instruments). W warunkach pomiarowych, tzn. przy napięciu przyspieszającym 15 kV, kącie odbioru 25° i gęstości stali ŁH15 $7,6 \text{ g/cm}^3$ średnica strefy wzbudzenia wynosi ok. $0,7 \mu\text{m}$. Zatem do analizy materiałów powłokowych o grubości większej, niż średnica strefy wzbudzenia wykorzystano klasyczne procedury obowiązujące dla materiałów litych.

WYNIKI BADAŃ

Ja widać na zdjęciach (**Rys. 2a, b, c**) elementów pokrytych cienkimi twardymi powłokami uszkodzenie zmęczeniowe (pitting) ma wielokrotnie większą głębokość niż grubość powłoki (**Rys. 2**). Charakter uszkodzeń widocznych na zdjęciach – wskazuje na mechanizm inicjacji pęknięcia zmęczeniowego (pittingu) od stalowego podłoża – w punkcie Bielajewa.

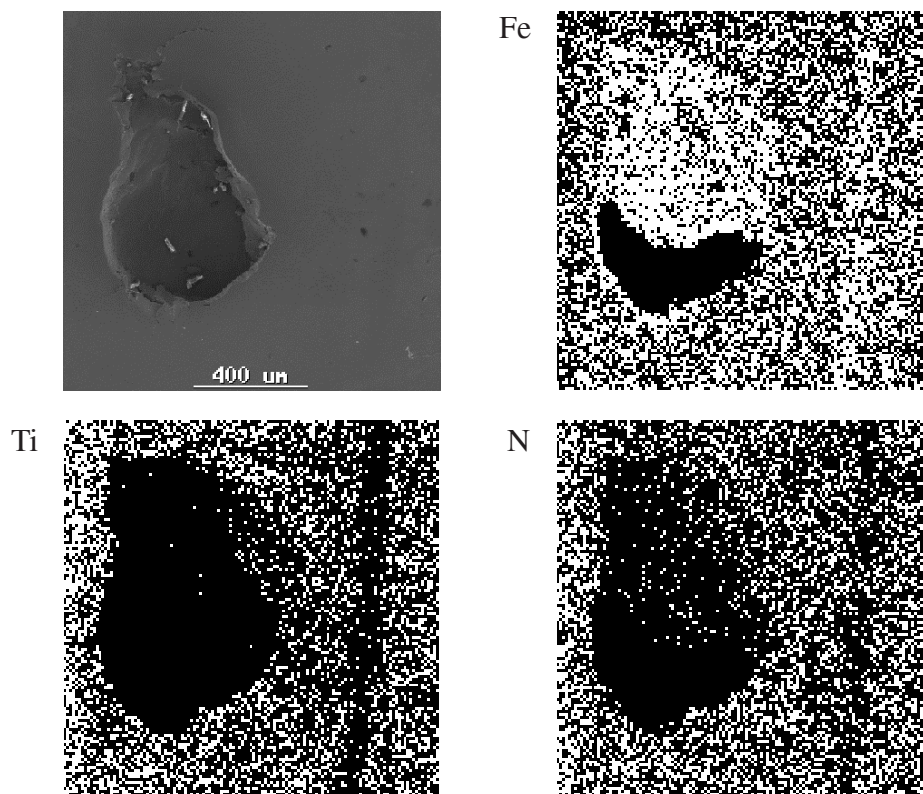


Rys. 2. Uszkodzenie zmęczeniowe na kulce pokrytej powłoką TiN dla różnych środków smarowych: a) olej bazowy, b) olej bazowy z dodatkiem AW, c) olej bazowy z dodatkiem EP

Fig. 2. Typical images of pitting defects on TiN covered steel balls lubricated with: a) base oil, b) base oil with AW additive, c) base oil with EP additive

Cykliczny proces obciążania, determinujący występowanie znacznych naprężeń stycznych nie powoduje łuszczenia warstwy TiN na nieuszkodzonym obszarze śladu tarcia. Dowodem potwierdzającym obecność ciągłej powłoki TiN na powierzchni śladu tarcia jest analiza rozkładu powierzchniowego tytanu obecnego w powłoce i żelaza – głównego składnika podłoża (**Rys. 3**). Stężenie tytanu na śladzie i poza jest w zasadzie jednakowe. W miejscach gdzie nastąpił pitting ujawnia się podłoże – najintensywniejszy sygnał otrzymujemy od Fe. W obrębie powłoki widoczny jest sygnał pochodzący od żelaza wynikający ze faktu wzbudzenia pierwiastków podłoża – leżących pod powłoką.

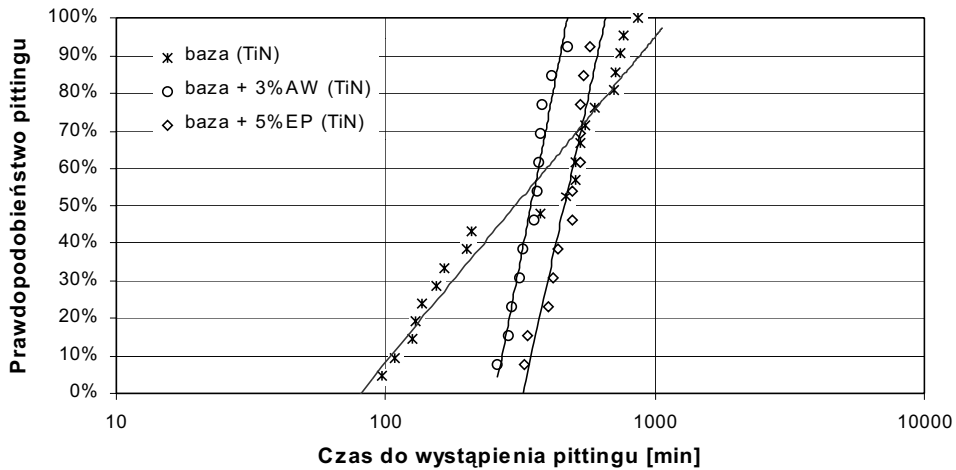
Zatem, w trakcie całego biegu badawczego aż do chwili wystąpienia uszkodzenia pittingowego TiN tworzy ciągłą powłokę.



Rys. 3. Obraz SEM oraz powierzchniowy pierwiastków na powierzchni śladu zużycia kulki pokrytej powłoką TiN oraz analiza rentgenowska rozkładu powierzchniowego Fe, Ti i N (15 kV)

Fig. 3. SEM image of the wear scar and X-ray (EDS) map for Fe, Ti and N for steel balls covered with TiN coating (15 kV)

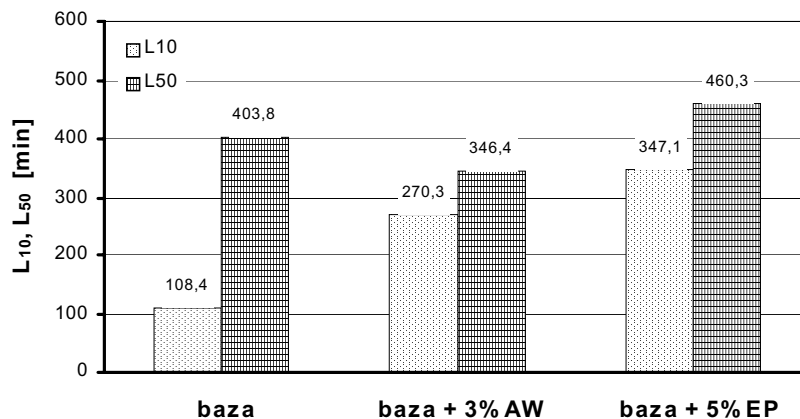
Prawdopodobieństwa wystąpienia uszkodzenia na kulce górnej (pokrytej powłoką TiN) w funkcji czasu przy smarowaniu bazą oraz olejami z dodatkami zostały zmieszczone na **Rys. 4**.



Rys. 4. Porównanie prawdopodobieństw wystąpienia uszkodzenia dla oleju bazowego oraz oleju bazowego z dodatkami AW i EP

Fig. 4. Fatigue life for base oil and base oil with AW and EP additives

Dla każdego środka smarowego wyznaczono parametry L_{10} i L_{50} (**Rys. 5**).



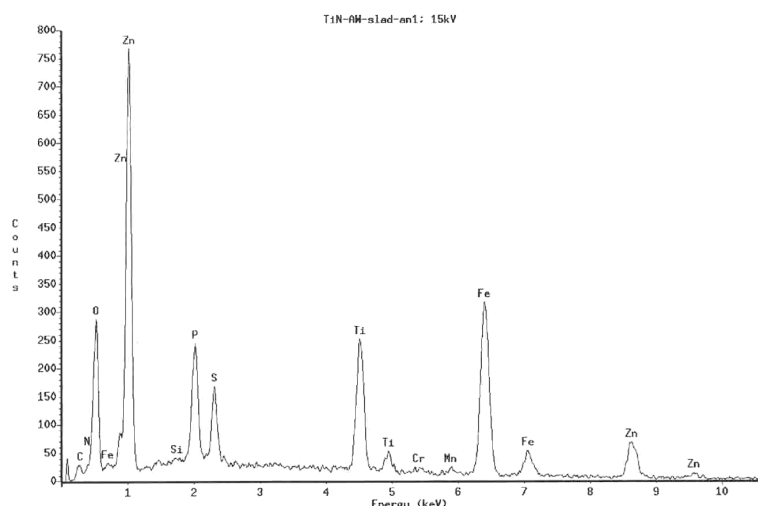
Rys. 5. Porównanie parametrów L_{10} i L_{50} dla oleju bazowego oraz oleju bazowego z dodatkami AW i EP

Fig. 5. L_{10} and L_{50} lives for base oil and base oil with AW and EP additives

Powłoka TiN o grubości 2 μm niekorzystnie wpłynęła na powierzchniową trwałość zmęczeniową pokrytych elementów.

Obecność dodatków w oleju korzystnie wpłynęła na powierzchniową trwałość zmęczeniową elementów z powłoką TiN. W wyniku ich zastosowania nastąpił wzrost powierzchniowej trwałości zmęczeniowej charakteryzowany parametrem L_{10} (dla dodatku typu AW o 150%, dla dodatku typu EP o 220%). Natomiast wartość parametru L_{50} dla oleju z dodatkiem AW zmalała a dla oleju z dodatkiem typu EP wzrosła.

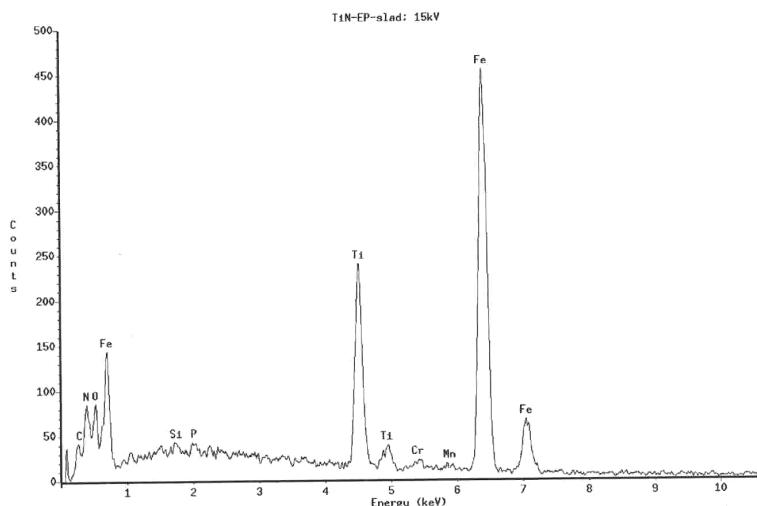
Nie znaleziono związku pomiędzy detektowanymi techniką EDS produktami reakcji tribochemicznych a trwałością zmęczeniową. Dla oleju z dodatkiem typu przeciwzużyciowego (AW) zidentyfikowano pierwiastki pochodzące z powłoki (Ti, N) oraz pochodzące z dodatku smarnościowego (Zn, S, P) – **Rys. 6**.



Rys. 6. Widmo rentgenowskie z powierzchni śladu tarcia elementu pokrytego powłoką TiN (15 kV, olej RL-144/4 + 3%AW)

Fig. 6. EDS spectrum from wear track of TiN covered steel specimen (15 kV, oil RL144/4+3%AW)

Dla dodatku EP w obrębie śladu tarcia zidentyfikowano śladowe ilości siarki i fosforu pochodzące z dodatków smarnościowych (**Rys. 7**). Śladowe ilości S i P przy identyfikowanej znacznej ilości Fe sugerują, że w warunkach tarcia tocznego (odmiennie niż w przypadku tarcia ślizgowego) dodatki typu EP nie modyfikują warstwy wierzchniej.



Rys. 7. Widmo rentgenowskie z powierzchni śladu tarcia elementu pokrytego powłoką TiN (15 kV, olej RL-144/4 + 5%EP)

Fig. 7. EDS spectrum from wear track of TiN covered steel specimen (15 kV, oil RL144/4+5%EP)

PODSUMOWANIE

Powłoki TiN pomimo licznych zalet (dobra adhezja do podłoża, wysoka twardość zapewniająca odporność na ścieranie, wystarczająca ciągliwość by uniknąć łuszczenia, odporność chemiczna i inne) wciąż stosowane są jedynie w ograniczonym zakresie na smarowane elementy pracujące stykowo. Wynika to głównie z faktu ich negatywnego oddziaływania na pitting.

Wyniki przeprowadzonych badań tribologicznych wskazują, że oleje smarowe z dodatkami typu AW i EP wpływają korzystnie na powierzchniową trwałość zmęczeniową elementów pokrytych powłoką TiN. Zatem nie stanowi to przeszkody w aplikacji na istniejące rozwiązania konstrukcyjne maszyn i urządzeń smarowanych olejami o wysokich klasach jakościowych. Praktyczne zastosowanie powłoki TiN na elementy pracujące stykowo wymaga rozwiązania problemu technologicznej optymalizacji powłoki (grubość, adhezja, przygotowanie podłoża, stan naprężeń itp.), mającej na celu uzyskanie powłoki o porównywalnej do elementów stalowych odporności na pitting.

LITERATURA

1. Michalczewski R.: Badania tribologiczne elementów z powłokami przeciwzużyciowymi, tworzących smarowany styk skoncentrowany. Rozprawa Doktorska. Łódź 2002.
2. Michalczewski R., Szczerek M.: Wpływ powłok przeciwzużyciowych nakładanych na elementy trące na nośność warstwy smarowej. *Tribologia*. 2000, nr 1, s. 111÷119.
3. Holmberg K., Matthews A.: *Coating Tribology*. Elsevier. Amsterdam 1994.
4. Hedenqvist P., Hansson G.: PVD-coating of machine components. *Materiały 8 Międzynarodowej Konferencji NORDTRIB'98*. Ebeltoft 1998, s. 943÷948.
5. Boving, H., Hintermann, H.E., Begelinger, A., DE Gee, A.W.J.: Load-carrying capacity of lubricated steel point contacts coated by chemical vapour deposition. *Wear*. 1983, nr 88, s. 13÷22.
6. Hultman A., Sjostrom H.: Hard coating for heavy bearing duty. *Evolution*. 1998, nr 3. <http://evolution/skf.com>
7. Berrios J. A., Teer D. G., Puchi-Cabrera E. S.: Fatigue properties of a 316 L stainless steel coated with different TiN deposits. *Surface and Coating Technology*. 2001, nr 148, s. 179÷190.
8. Chang T. P., Heng H. S.: The influence of coating thickness on lubricated rolling contact fatigue life. *Surface and Coating*. 1990, nr 43/44, s. 699÷708.
9. Kuhn M., Gold P. W., Assmann C., Loos J.: Influences on the durability of PVD-coatings in roller bearings. 13th International Colloquium Tribology. Esslingen, Niemcy, 2002.
10. Bouzakis K. D., Vidakis N., Lontos A., Mitsi S., David K.: Implementation of low temperature-deposited coating fatigue parameters in commercial roller bearing catalogues. *Surface and Coatings Technology*. 2000, nr 133–134, s. 489÷496.
11. Polonsky I. A., Chang T. P., Keer L. M., Sproul W. D.: A study of rolling-contact fatigue of bearing steel coated with physical vapour deposition TiN films: Coating response to cyclic contact stress and physical mechanisms underlying coating effect on the fatigue life. *Wear*. 1998, nr 215, s. 191÷204.
12. Bouzakis K. D., Vidakis N., Mitsi S.: Fatigue prediction of thin hard coatings on the steel races of hybrid bearings used in high speed machine tools spindles. *Journal of Tribology*. 1998, nr 120, s. 835÷842.
13. Rico J. E., Battez A. H., Cuervo D. G.: Rolling contact fatigue in lubricated contacts. *Tribology International*. 2003, nr 36, s. 35÷40.

Recenzent:
Janusz JANECKI

Summary

The results of rolling contact fatigue tests of TiN coated specimens were presented and discussed. TiN coating was deposited using arc-vacuum technique. This coating is commonly applied to increase the resistance to scuffing of lubricated machine parts. The aim of research was to estimate the effect of antiwear (AW) and extreme pressure (EP) oil additives on fatigue life of TiN coated parts. The tests were performed using four ball tester according to IP 300/87 standard. The worn surfaces were observed employing optical microscopy, SEM and analysed using EDS technique.

The obtained results indicate that it is possible to increase fatigue life of TiN coated parts through selection of lubricating additives.

Jarosław MOLENDĄ*, Marian GRĄDKOWSKI*

**TRIBOCHEMICZNE ODDZIAŁYWANIA
POMIĘDZY DIALKILODITIOFOSFORANEM
CYNKU ORAZ 3-ALLILOKSY-1,2-PROPANODIOLEM**

**TRIBOCHEMICAL INTERACTIONS BETWEEN
ZINC DIALKYLDITHIOPHOSPHATE
AND 3-ALLYLOXY-1,2-PROPANDIOL**

Słowa kluczowe

Dodatki przeciwzużyciowe, przemiany tribochemiczne, synergizm

Key-words

Antiwear additives, tribochemical changes, synergism

Streszczenie

Zbadano przemiany tribochemiczne binarnego układu dodatków uszlachetniających: dialkiloditiofosforanu cynku i 3-alliloksy-1,2-propanodiolu w modelowej węglowodorowej bazie olejowej. Zaobserwowano synergizm ich działania przeciwzużyciowego, który wynika z charakteru powstających warstw granicznych. Zidentyfikowano budowę chemiczną związków

* Instytut Technologii Eksploatacji w radomiu, ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, tel. (048) 36-442-41.

wchodzących w skład warstwy granicznej. Stwierdzono obecność w nich m.in. alkoholi, kwasów karboksylowych, karboksylanów, kompleksów fosforanowych a także związków nieorganicznych, w szczególności tlenków i węglików żelaza.

WPROWADZENIE

Dialkilditiofosforan cynku jest często stosowanym dodatkiem uszlachetniającym do olejów smarowych. Wykazuje on właściwości przeciwutleniające, przeciwozryziowe, przeciwkorozyjne już przy niewielkich stężeniach (1-2% m/m) a także dobrą stabilność termiczną [L. 1–5]. Nie bez znaczenia jest jego względnie niska cena. Stwierdzono [L. 6–8], że 3-allyloksy-1,2-propanodiol wykazuje się wysoką zdolnością redukcji zużycia elementów wężła tarcia. Jest więc potencjalnym nietoksycznym dodatkiem przeciwozryziowym należącym do grupy tzw. dodatków CHO, nie zawierających pierwiastków szkodliwych ekologicznie. Jednak jego właściwości tribologiczne badano w postaci indywidualnego roztworu w rozpuszczalniku węglowodorowym. Celowe jest zatem zbadanie interakcji 3-allyloksy-1,2-propanodiol z typowymi dodatkami (np. dialkilditiofosforanem cynku), które mogą zmieniać efektywność tribologiczną związku aktywnego.

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

W eksperymentach stosowano kompozycje smarowe, zawierające 1% m/m 3-allyloksy-1,2-propanodiolu i 2% m/m ZDDP w n-heksadekanie (C16), jako modelowej bazie olejowej. Skład kompozycji modelowej ustalono w oparciu o analizę danych literaturowych [L. 8] oraz rezultatów prac własnych [L. 9].

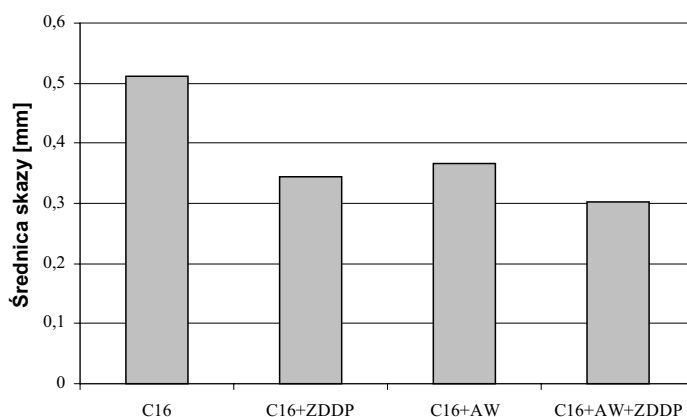
Badania smarności kompozycji modelowych przeprowadzono za pomocą testera T-11, prod. ITeE w Radomiu [L. 10], w następujących warunkach: struktura wężła tarcia – kula-tarcza (L?), układ materiałowy – stal-stal (UH 15, 60 HRC), obciążenie wężła – 9,81 N, prędkość poślizgu – 0,25 m/s, droga tarcia – 500 m. Testy tribologiczne przeprowadzono w temperaturze 80°C. W tych warunkach, oprócz inicjowania reakcji tribochemicznych przez egzoelektrony, mogą zachodzić procesy podtrzymywane termicznie [L. 11–13]. Właściwości przeciwozryziowe kompozycji smarowej określano na podstawie wielkości śladu zużycia na kulkach. Jako

wynik przyjmowano średnią arytmetyczną z trzech testów, nie obciążonych błędem grubym.

Do badania struktury chemicznej produktów triboreakcji zastosowano skaningową mikroskopię elektronową (SEM) sprzężoną z mikroanalizatorem rentgenowskim (EDS) – powiększenie 40x lub 2000x, napięcie przyspieszające 40 keV, kąt odbioru 25o, mikrospektrofotometrię w podczerwieni (FTIR) – rozdzielczość 4 cm⁻¹, widma odbiciowe, 30 skanów dla każdego punktu oraz rentgenowską spektroskopię fotoelektronów (XPS) – źródło Al monochromatyczne, o nominalnej mocy 300 W. Elementy wężła tarcia przed analizami przemywano n-heksanem, a następnie suszono pod obniżonym ciśnieniem.

WYNIKI I ICH DYSKUSJA

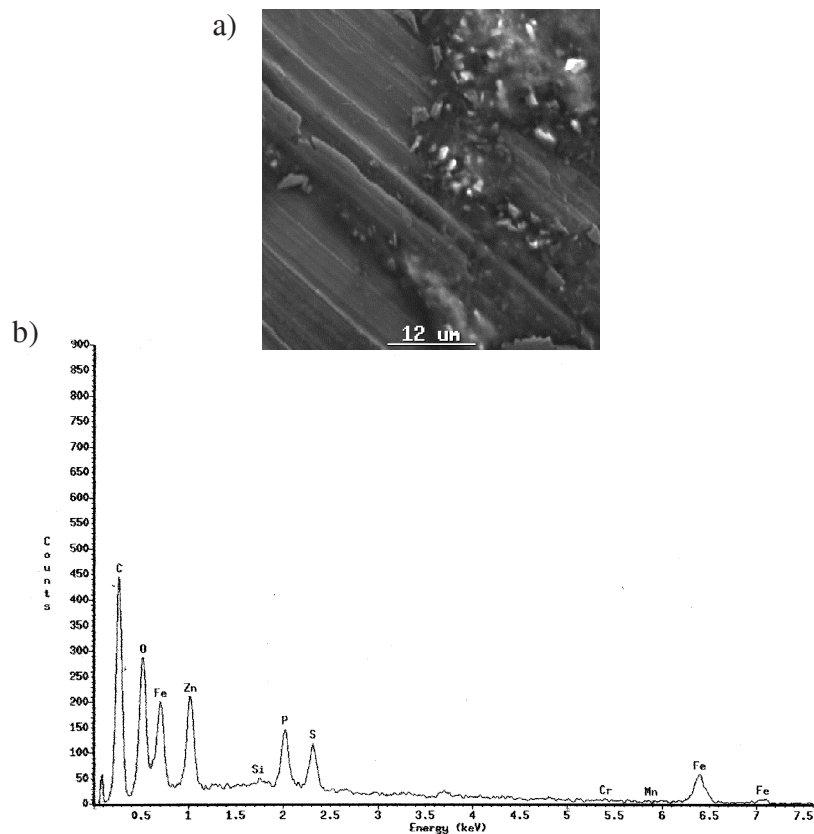
Rezultaty badań tribologicznych przedstawiono na **Rys. 1**.



Rys. 1. Wpływ składu kompozycji smarowej na zużycie kulki w temperaturze 80°C
Fig. 1. Influence of lubricant composition on the ball wears at 80°C

Jak wynika z danych przedstawionych na **Rys. 1**, w temperaturze 80°C obserwuje się wyższe oddziaływanie przeciwzużyciowe kompozycji binarnej w n-heksadekanie niż pojedynczych dodatków. Efekt synergiczny może wynikać ze zintensyfikowania przemian tribochemicznych, w wyniku których powstają produkty stabilizujące warstwę graniczną. Powstawanie warstw ochronnych na powierzchni tarcia potwierdza obraz SEM fragmentu powierzchni tarczy, przedstawiony na **Rys. 2a**. Skład pierwiastko-

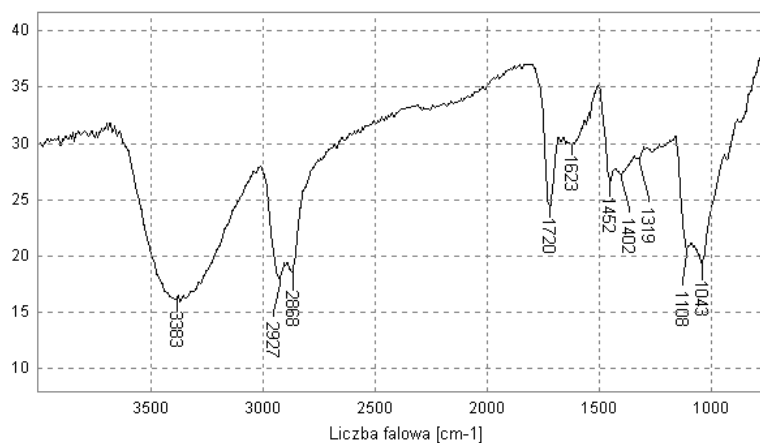
wy tej warstwy zbadano za pomocą EDS, a uzyskane widmo przedstawiono na **Rys. 2b**.



Rys. 2. Wyniki badań SEM/EDS produktów przemian tribochemicznych przebiegających z udziałem ZDDP+AW a) obraz SEM (pow. 2000x), b) widmo EDS
 Fig. 2. SEM/EDS analysis of tribochemical products forming during friction lubricated with AW+ZDDP: a) SEM image (2000x), b) EDS spectrum

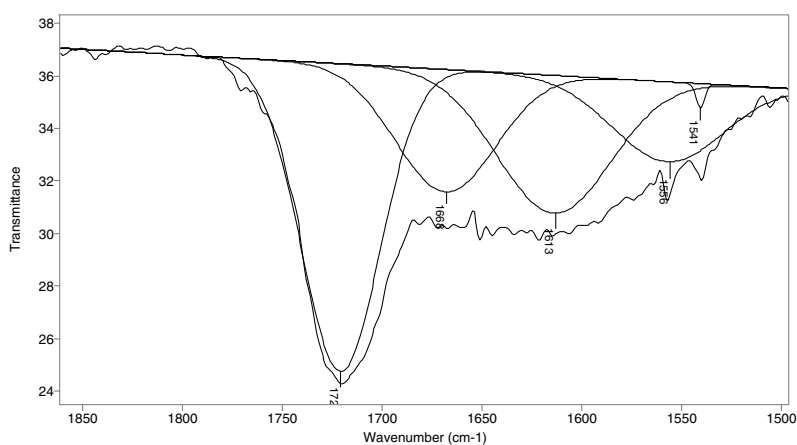
W warstwie zdeponowanej na powierzchni tarcia stwierdzono obecność: żelaza, cynku, chromu, krzemu, węgla, tlenu, fosforu i siarki – widmo EDS, **Rys. 2b**. Tak więc w warstwie tej znajdują się pierwiastki pochodzące z dialkilditiofosforanu cynku i 3-alliloksy-1,2-propanodiolu oraz metalu podłoża (krzem, żelazo, chrom). Wysoka intensywność sygnału węgla wskazuje na obecność także produktów organicznych. Potwierdzają to wyniki badania widma FTIR (**Rys. 3**) warstwy zdeponowanej na powierzchni tarcia. Przedstawione widmo charakteryzuje się rozmytymi pa-

smami, co sugeruje nakładanie się sygnałów, pochodzących od drgań zbliżonych struktur cząsteczkowych. W związku z tym przeprowadzono matematyczną dekonwolucję pasm [L. 14] w zakresie 1860–1500 cm^{-1} (Rys. 4) i 1160–880 cm^{-1} (Rys. 5).



Rys. 3. Widmo FTIR produktów przemian tribochemicznych, zdeponowanych na powierzchni tarcia w obecności kompozycji C16+AW+ZDDP w temp. 80°C

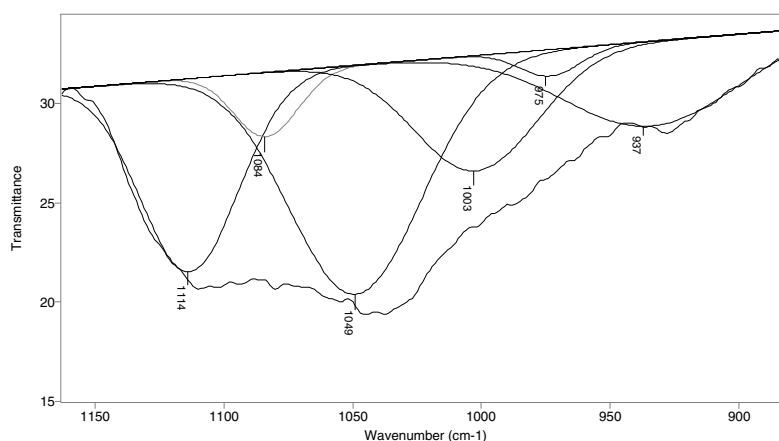
Fig. 3. FTIR spectrum of tribochemical products layered on the friction surface lubricated with C16+AW+ZDDP at 80°C



Rys. 4. Rezultat dekonwolucji pasma w zakresie liczb falowych 1860-1500 cm^{-1}

Fig. 4. Deconvolution of 1860-1500 cm^{-1} band

Analiza rozdzielonych pasm widma FTIR wykazuje obecność związków karbonylowych: aldehydów i kwasów karboksylowych (1720 cm^{-1}). Brak jest natomiast ketonów. Oznacza to, że nastąpiło rozerwanie wiązania C-C w 3-alliloksy-1,2-propanodiolu przy węglu związanym z grupą hydroksylową w pozycji 2. W warstwie produktów triboreakcji obecne są karboksylany – pasmo przy 1556 cm^{-1} (asymetryczne drgania walencyjne anionu karboksylanowego). Występujący w nich atom metalu może być chelatowany, na co wskazuje szeroki sygnał przy liczbie falowej 1613 cm^{-1} [L. 15, 16].

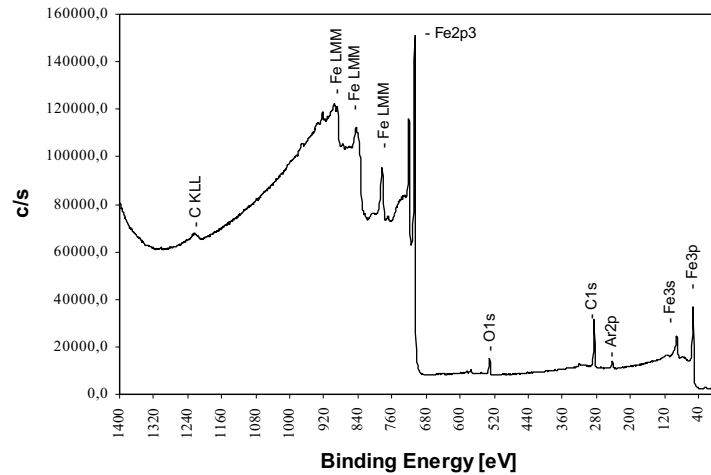


Rys. 5. Dekonwolucja pasma w zakresie liczb falowych $1160\text{--}880\text{ cm}^{-1}$

Fig. 5. Deconvolution of $1160\text{--}880\text{ cm}^{-1}$ bands

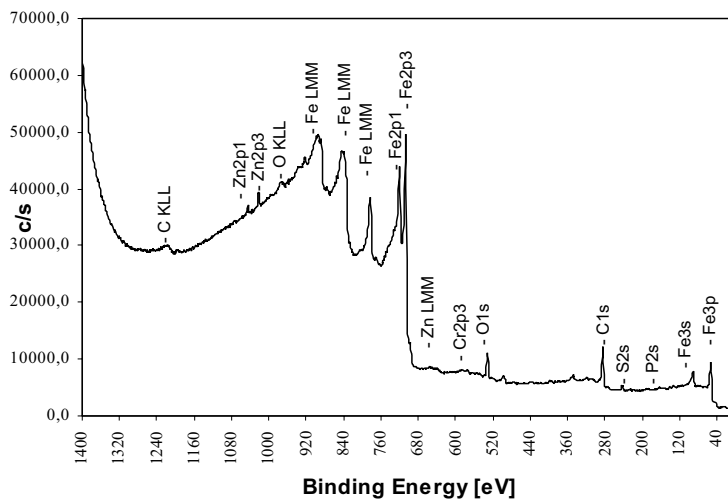
W przedstawionym na **Rys. 5** widmie występują m.in. pasma związane z drganiami struktur C-O (1114 cm^{-1}), P-O-C (1049 cm^{-1} oraz 1003 cm^{-1}), C-O-C (1084 cm^{-1}), a także pasma drgań struktur fosforanowych P-O-P (975 cm^{-1}) [L. 15]. Bardziej szczegółowe informacje o strukturze cząsteczkowej produktów triboreakcji uzyskano w wyniku badań XPS.

W widmie przeglądowym (**Rys. 6**), pochodzącym z powierzchni poza strefą tarcia, oprócz sygnału żelaza występują sygnały tlenu, węgla i argonu (obecność argonu jest wynikiem trawienia jonowego powierzchni próbki za pomocą jonów argonu). Znacznie „bogatsze” jest widmo XPS ze strefy tarcia (**Rys. 7**). Oprócz żelaza, tlenu, węgla i argonu, obecne są w nim sygnały cynku, siarki oraz fosforu – pierwiastków wchodzących w skład dialkiloditiofosforanu cynku.



Rys. 6. Widmo przeglądowe XPS zarejestrowane poza obszarem skumulowania produktów przemian tribochemicznych

Fig. 6. XPS spectrum recorded outside area of tribochemical products

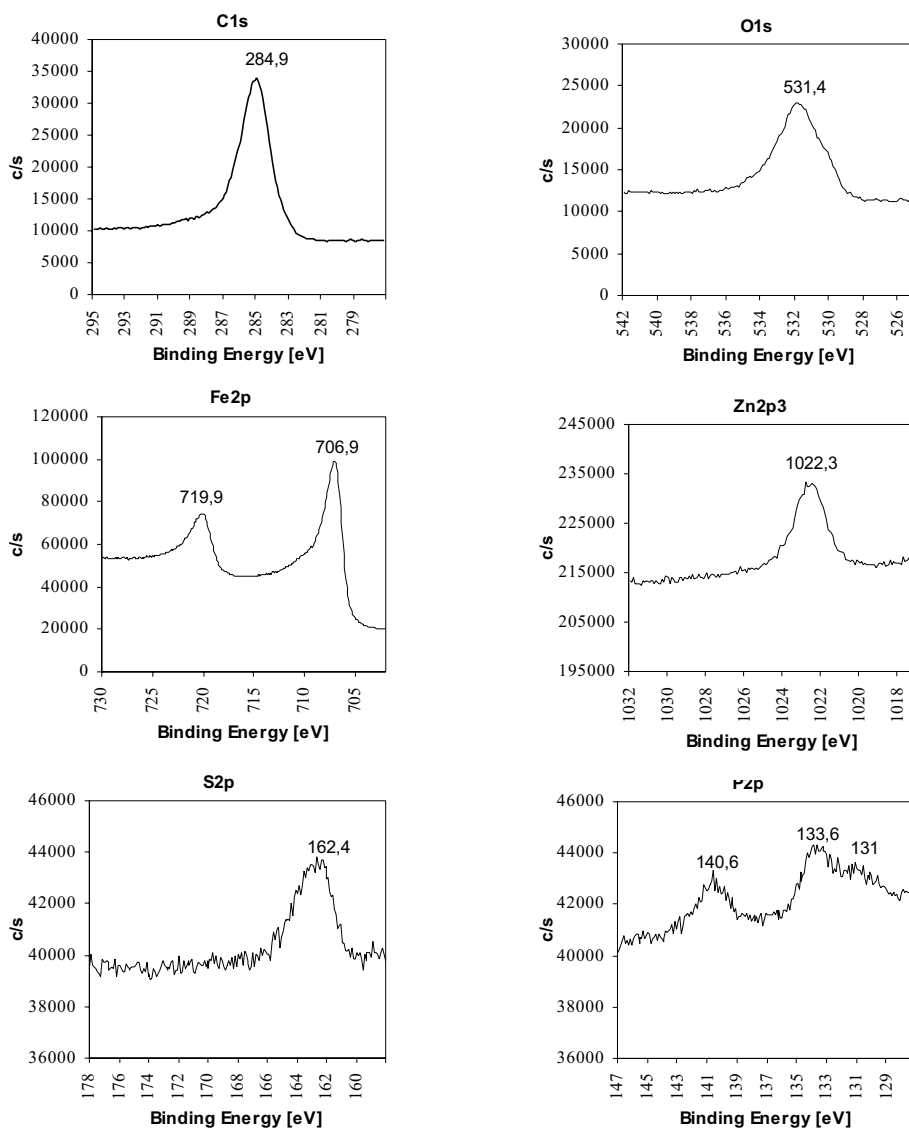


Rys. 7. Widmo przeglądowe XPS zarejestrowane w obszarze skumulowania produktów przemian tribochemicznych

Fig. 7. XPS spectrum of tribochemical products

Rodzaj połączeń chemicznych poszczególnych pierwiastków, wchodzących w skład produktów przemian tribochemicznych identyfikowano w oparciu o analizę energii wiązań, indykowanych na podstawie charakte-

rystycznych fotoelektronów. Widma charakterystyczne, wraz z przypisanymi energiami zamieszczono na **Rys. 8**. W wyniku przeprowadzonej dekonwolucji pasma C1s (**Rys. 9a**) można dopasować cztery linie. Najwyż-

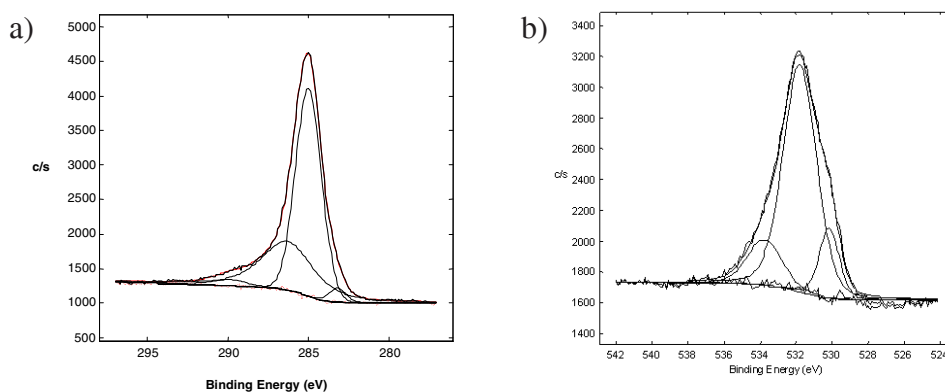


Rys. 8. Widma fotoelektronów pierwiastków wchodzących w skład produktów przemian tribochemicznych kompozycji dilalkiloditifosforanu cynku i 3-alliloksy-1,2-propanodiolu w n-heksadekanie

Fig. 8. XPS spectra of elements including in products of C16+AW+ZDDP tribochemical changes

szą intensywnością sygnału charakteryzują się pasma przy 285 eV i ok. 287 eV. Sygnał przy energii ok. 285 eV może pochodzić od atom węgla występującego w łańcuchach węglowodorowych związków zdeponowanych na powierzchni. Pomiar wykonano po trawieniu jonowym, a więc detektowany sygnał pochodzi od węgla substancji związanych z powierzchnią. Natomiast sygnał przy 287 eV odpowiada atomom węgla organicznych struktur typu $-\text{CH}_2\text{O}-$ (np. w alkoholach, eterach lub estrach). Obecność struktur estrowych potwierdza występowanie sygnału, zlokalizowanego przy 290 eV. Energia 290 eV jest charakterystyczna dla węgla występującego w grupie karboksylanowej, a więc związanego z dwoma atomami tlenu [L. 17]. Natomiast sygnał o małej intensywności, zlokalizowany przy 283 eV, może wynikać z obecności w mieszaninie produktów przemian tribochemicznych węglików metali [L. 18].

Obecność związków tlenoorganicznych o strukturze karboksylanów oraz estrów wynika również z analizy widm XPS w zakresie energii, charakterystycznych dla fotoelektronów O1s. Na Rys. 9b przedstawiono wynik dekonwolucji pasma fotoelektronów tlenu. Dopasowano trzy linie. Można przypisać im różne stany chemiczne tlenu. Linia w 530,2 eV odpowiada tlenkom metalu, np. Fe_2O_3 . Sygnał przy 531,8 eV związany jest z obecnością atomów tlenu w grupie karboksylanowej, zdolnej do tworzenia struktur chelatowych. Natomiast pasmo przy energii 533,8 może odpowiadać tlenkowi krzemu.



Rys. 9. Dekonwolucja pasma fotoelektronów: a) C1s oraz b) O1s

Fig. 9. Deconvolution of C1s and O1s photoelectrons bands

PODSUMOWANIE

W oparciu o wyniki przeprowadzonych badań stwierdzono, iż w wyniku przemian tribochemicznych kompozycji 3-alliloksy-1,2-propanodiol oraz ZDDP powstają produkty, tworzące warstwy graniczne zdolne do redukcji zużycia. W strefie tarcia przebiegają reakcje prowadzące do skrócenia łańcuchów węglowodorowych komponentów środka smarowego oraz ich wolnorodnikowego utleniania. Powstające w ich wyniku produkty uczestniczą w reakcjach tribochemicznych, przebiegających na granicy faz medium smarowe-robocza powierzchnia węzła tarcia. Na granicy faz przebiegają także reakcje prowadzące do powstawania struktur kompleksowych a także związków nieorganicznych, w szczególności tlenków i węglików żelaza.

LITERATURA

1. Jahanmir S.: Wear reduction and surface layer formation by ZDDP additive. *J. of Trib.*, 1986, 46, 1–10.
2. Willermet P.A. et al.: Mechanism of formation of antiwear films from zinc dialkyldithiophosphates. *Trib. Int.*, 1995, 28, 3, 177–187.
3. Molenda J., Makowska M.: Udział dialkiloditiofosforanu cynku w kształtowaniu warstwy wierzchniej elementów węzła tarcia. *Problemy Eksploatacji*, 2000, 4, 113–119.
4. Tuszyński W., Molenda J., Makowska M.: Tribochemical conversions of zinc dialkyldithiophosphate under extremely different pressure conditions. *Trib. Lett.*, 2002, 13, 2, 103–109.
5. Yamaguchi E.S., Ryason P.R.: Structures of adsorbed zinc ditiophosphates and their relationship to engine wear. *Tribotest*, 1996, 3, 123–136.
6. Igari S., Takigawa Y., Mori S., Yashimoto M.: Tribochemical reactions of 1-dodecene with aluminium. *Jap. J. of Trib.*, 1993, 38, 12, 1587–1596.
7. Kajdas C., Molenda J., Makowska M., Grądkowski M.: Investigation of tribochemical behaviour of some unsaturated organic additives in steel-steel contact. *Proc. of Symp. on Lubricating Materials and Tribochemistry*, Lanzhou, China, 1998, 83–94.
8. Bushan B.: *Modern tribology handbook. Principles of tribology*. CRC Press, LLC, USA, 2001.
9. Molenda J., Grądkowski M.: Wpływ budowy i stężenia nienasyconych związków eterowych na właściwości przeciwwużyciowe modelowych cieczy smarowych. *Problemy Eksploatacji*, 1999, 4, 135, 144.
10. Piekoszewski W., Szczerek M., Wulczyński J.: Urządzenie typu trzpień-tarcza do badań tribologicznych w podwyższonych temperaturach. *Tribologia*, 5–6, 1997, 826–832.

11. Hsu S.M. et al: Tribochemistry induced by nano-mechanical scratches. Proc. of Int. Trib. Congr. Nagasaki (Japan), 2000, 25–30.
12. Nakayama K.: Triboemission of charged particles and resistivity of solids. Trib. Lett., 1999, 6, 37–40.
13. Molenda J., Grądkowski M., Kajdas C., Makowska M.: Wpływ temperatury na antyzużyciowe oddziaływania tribochemiczne. Problemy Eksploatacji, 1998, 2, 207–216.
14. Griffiths P.R., Haseth J.A: Fourier transform infrared spectrometry. J. Wiley&Sons, NY-Chichester-Brisbane-Toronto-Singapore 1986.
15. Zieliński W., Rajca A.: Metody spektroskopowe i ich zastosowanie do identyfikacji związków organicznych. WNT, Warszawa, 2000.
16. Brzyska W.: Sposoby koordynacji grupy karboksylowej w kompleksach metali z kwasami karboksylowymi. LAB, 2002, 1, 20–26.
17. Briggs D., Seah M.P.: Practical surface analysis. J. Wiley&Sons, New York (USA), 1996.
18. Geib K.M., Wilmsen C.W.: Iron carbide formed by reacting surface hydrocarbons with an iron film. Surf. Sci. Spec., 1992, 1, 3, 297–300.

Recenzent:
Ryszard MARCZAK

Summary

It was investigated tribochemical reactions of binary package (zinc dialkyldithiophosphate and 3-allyloxy-1,2-propanndiol) in hydrocarbon base oil. It was observed an antiwear synergetic effect between the additives which take part in formation boundary layer. The layers consist of alcohols, carboxylic aids, carboxylates, phosphates, complex compounds, especially oxides and iron carbides.

Karol NADOLNY*, Jarosław SELECH*, Przemysław TYCZEWSKI*

ZMIANY STRUKTURY GEOMETRYCZNEJ POWIERZCHNI POWSTAŁE PODCZAS TESTÓW ZUŻYCIOWYCH

THE INFLUENCE OF ABRASIVE-CORROSIVE WEAR ON CHANGE OF SURFACE ROUGHNESS

Słowa kluczowe:

mikrostruktura, zużywanie ściernie, zużywanie korozyjne, warstwa wierzchnia,

Key words:

microstructure, abrasive wear, corrosive wear, surface layer,

Streszczenie

W pracy przedstawiono zaobserwowane zmiany parametrów chropowatości powierzchni ślizgowej próbek wykonanych ze stali 45 poddanych testom ścierno-korozyjnym. Porównano uzyskane wartości dla różnych warunków współpracy węzła, przedstawiono profilogramy oraz profile nośności.

* Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, Politechnika Poznańska, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań.

WPROWADZENIE

Definicja technologicznej warstwy wierzchniej a więc warstwy świadomie utworzonej przez człowieka zawarta jest w normie (PN-87/M-04250), ale interpretacja tej definicji nie jest jednoznaczna. Dla potrzeb inżynierskich dobrą definicją jest następujące sformułowanie: „warstwa wierzchnia to ta część materiału przylegająca do powierzchni wraz z powierzchnią, której własności fizyczne różnią się od reszty materiału nazywanego dalej rdzeniem” [L. 1]. Sformułowanie to nie jest jednak do końca ścisłe, ponieważ granica zmiany własności fizycznych zależy od dokładności ich pomiaru a zatem od obserwatora.

Podstawowymi cechami warstwy wierzchniej (WW) decydującymi o jej wpływie na właściwości użytkowe są:

- chropowatość powierzchni,
- skład chemiczny i struktura WW,
- skład chemiczny i budowa warstw tlenkowych,
- umocnienie WW,
- rozkład naprężeń,
- wielkość i rozkład: wtrąceń, nieciągłości i wad struktury WW.

Ocena ilościowa większości tych cech jest bardzo pracochłonna i nie zawsze możliwa; ponadto niektóre z wymienionych cech są trudne do wyizolowania w celu przeprowadzenia badań jednoczynnikowych [L. 2]. Z tego powodu wnioskowanie o związkach pomiędzy poszczególnymi właściwościami użytkowymi części maszyn i konkretnymi cechami WW ma w wielu przypadkach charakter dedukcyjny lub oparte jest na badaniach statystycznych.

Integralnym elementem warstwy wierzchniej, o szczególnie dużym znaczeniu zarówno praktycznym, jak i w badaniach trybologicznych, jest charakterystyka chropowatości warstwy wierzchniej. Do opisu profilu w badaniach trybologicznych stosuje się obecnie kilkanaście spośród kilkudziesięciu możliwych do zarejestrowania parametrów [L. 3, 5]. Parametry te oraz funkcje profilu chropowatości można podzielić wg własności opisujących:

- cechy wysokościowe,
- cechy horyzontalne (wzdłużne),
- kształt nierówności,
- rozkłady statystyczne,
- parametry rozkładów,
- funkcje częstotliwościowe.

Z przeprowadzonych dotychczas badań wynika [L. 4], że pomiędzy parametrami wysokościowymi oraz horyzontalnymi istnieje silna korelacja statystyczna. Dlatego do opisu profilu należałoby stosować następujący zbiór parametrów: R_a , S_m , Δ_a , r , t_p , oraz określenie sposobu obróbki, kierunkowość śladów, profilogram powierzchni oraz jej topografię.

ZAKRES I WARUNKI BADAŃ

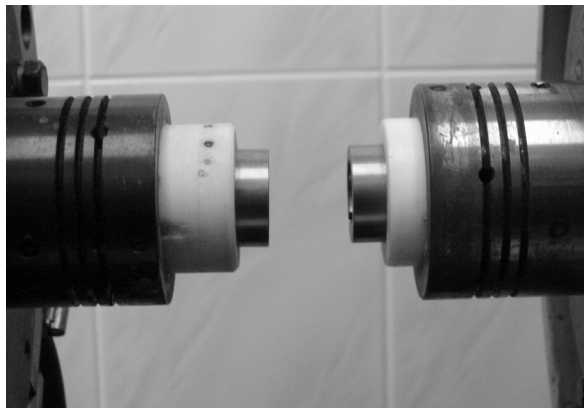
Opis próbki i stanowiska badawczego

Celem eksperymentu było zbadanie wpływu zużywania ścierno-korozyjnego przy zmiennych parametrach współpracy węzła trybologicznego na zmianę struktury geometrycznej powierzchni szlifowanej. Przeprowadzono pomiary chropowatości w układzie dwuwymiarowym dla różnych wariantów skojarzenia i porównano wielkość zmian wybranych parametrów. W badaniach przeprowadzonych na maszynie tarciowej UMT 2168 (Rys. 1), użyto węzła kinematycznego typu pierścień-pierścień, dwa pierścienie (próbka i przeciwpróbka) współpracowały w połączeniu czołowym (Rys. 2), przy czym jeden z nich był nieruchomy natomiast drugi obracał się z ustaloną prędkością ślizgania (V) i siłą nacisku (N).



Rys. 1. Fot. maszyny tarciowej UMT 2168

Fig. 1. Friction machine UMT 2168



Rys. 2. Zdjęcie węzła kinematycznego

Fig. 2. Kinematical junction

Szczegółowe dane dotyczące warunków współpracy węzła dla czterech wybranych wariantów zawiera **Tabela 1**.

Tabela 1. Zastosowane parametry współpracy

Table 1. Mating parameters applied

Wariant	Siła [N]	Prędkość [m/s]	Agresywność [%]	Fracja [mm]	Temperatura [°C]	Czas [s]
1	20	0,1	–	–	23 ± 2	1800
2	20	0,1	6	–	23 ± 2	1800
3	20	0,1	–	0,2	23 ± 2	1800
4	20	0,1	6	0,2	23 ± 2	1800

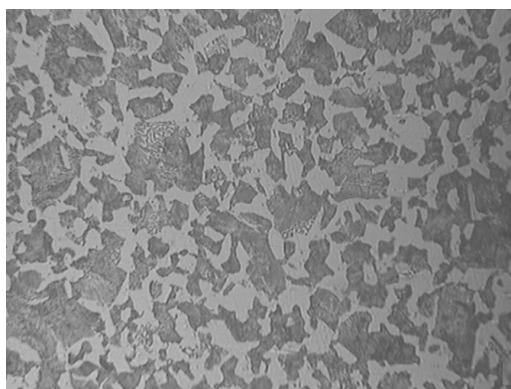
Całość zanurzona była w cieczy, którą w dwóch przypadkach skojarzeń była woda destylowana, a w dwóch pozostałych 6% roztwór kwasu siarkowego, podobnie użyto ścierniwa, jakim był piasek krzemowy o frakcji ziarna 0,1 mm i twardości $793 \pm 10\%$ HRC. Medium korozyjne wraz z piaskiem podawane było do układu w sposób ciągły, co zapewniło niezmienną agresywność środowiska oraz frakcji czynnika ściernego. Do nieruchomego pierścienia przyłożono napięcie pasywacyjne, które celem było niwelowanie skutków wpływu prądów korozyjnych powstających w roztworze. Za pomocą termopary kontrolowano temperaturę procesu, która utrzymywana była na stałym poziomie dla wszystkich wariantów eksperymentu. Czas trwania

procesu dla wszystkich wariantów wynosił 1800 sekund. Powierzchnie robocze próbek i przeciwpróbek przed testami obrobiono przez szlifowanie na ściernicy, co umożliwiło uzyskanie zbliżonych wyjściowych parametrów chropowatości dla wszystkich powierzchni współpracujących.

Do badań wybrano takie pary skojarzeniowe, w których warunki współpracy próbek były ustabilizowane tj. moment tarcia miał przebieg liniowy (nie wykazywał nagłych zmian). Przed testem zużyciowym i po jego zakończeniu dokonano pomiaru chropowatości powierzchni za pomocą profilometru niemieckiej firmy Hommelwerke T8000. Do pomiaru chropowatości wybrano po pięć losowo wybranych próbek z każdego wariantu badawczego, zmierzono parametry a następnie wartości uśredniono. Dóbr odcinka pomiarowego, odcinka elementarnego oraz ilość pojedynczych pomiarów wyznaczono na podstawie PN-87/M-042251 dla profilu losowego. W podobny sposób wyznaczono wartości parametrów dla próbek zużytych.

Charakterystyka wybranego materiału

Materiałem do badań wybrano szeroko opisywaną w literaturze stal 45, należy ona do stali niestopowych, konstrukcyjnych wyższej jakości, ogólnego przeznaczenia, skład chemiczny oraz własności mechaniczne podano w tabelach odpowiednio 2 i 3. Stal ta posiada strukturę ferrytyczno-perlityczną i udział obu faz jest podobny, zdjęcie struktury stali wykonane z powiększeniem 1000 krotnym przedstawiono na **Rysunku 3**.



Rys. 3. Struktura mikroskopowa stali 45 pow. 1000×

Fig. 3. Microscopic structure of steel 45 enlargement 1000×

Tabela 2. Skład chemiczny stali 45

Table 2. Mechanical qualities

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
0,45–0,50	0,50–0,58	0,17–0,37	≤0,04	≤0,04	≤0,30	≤0,30	≤0,10	≤0,30

Tabela 3. Własności mechaniczne stali 45

Table 3. Chemical constitution of steel 45

Wytrzymałość na rozciąganie	Granica plastyczności	Wydłużenie	Udarność	Twardość
R_m MPa	R_e MPa	A %	KU J	$HV 0,1$
≥600	≥355	16	≥32	241

WYNIKI BADAŃ

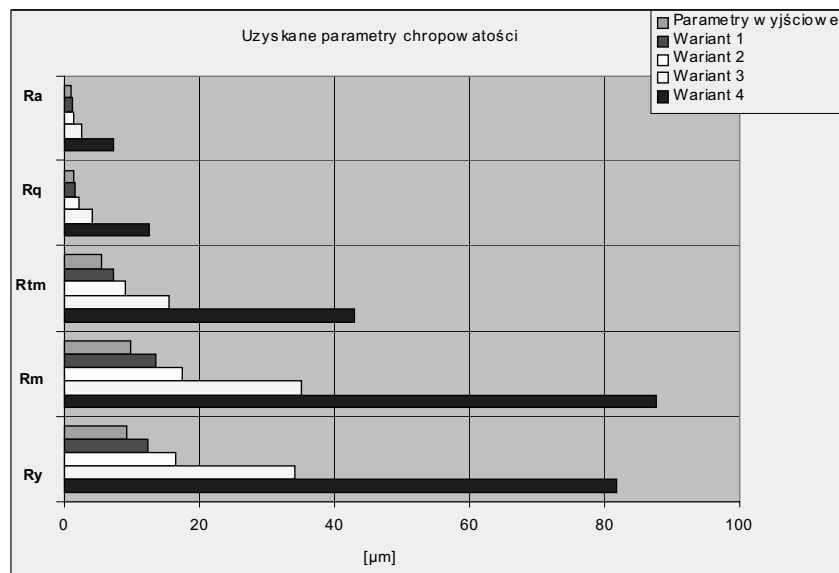
Porównanie parametrów wyników dla testu zasadniczego

Z przedstawionych badań wynika, że wpływ używania ścierno-korozyjnego przeprowadzony w określonych warunkach w znaczący sposób wpłynął na zmianę wielkości parametrów chropowatości (**Tab. 4, Rys. 4**).

Tabela 4. Porównanie zmiany wartości parametrów [μm]Table 4. Comparison of parameter value changes [μm]

Nr	Parametr	Parametry wyjściowe	Wariant 1	Wariant 2	Wariant 3	Wariant 4
1	R_a	0,95	1,20	1,49	2,57	7,15
2	R_q	1,36	1,73	2,17	4,12	12,45
3	R_m	5,63	7,10	9,15	15,66	42,92
4	R_m	9,83	13,56	17,50	35,20	87,64
5	R_y	9,40	12,32	16,60	34,30	81,79
6	S_m	42,42	196,02	206,35	209,76	277,84

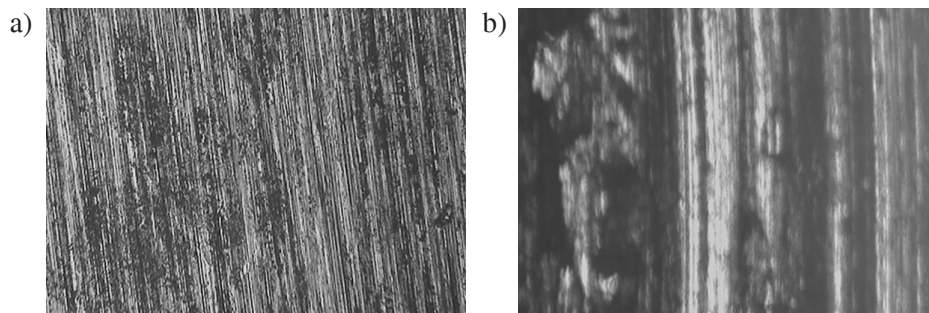
Zmiana wartości liczbowej parametru R_a związana jest w sposób pośredni z objętościami materiału (powyżej linii średniej), usuniętymi wskutek tarcia, zbliżoną interpretację można zastosować do parametru R_q , który jest średnim kwadratowym odchyleniem profilu od linii średniej, parametr ten jest jednak bardziej od parametru R_a wrażliwy na występowanie pojedynczych wzniesień lub wgłębień profilu. Zmianę wartości parametru R_m można powiązać ze zmianą grubości strefy chropowatości, która np. przy tarcu elastohydrodynamicznym może posłużyć do określenia minimalnej grubości warstwy smaru. Wartość tego parametru cechuje się dużym rozrzutem, gdyż zależy on od położenia ekstremalnych punktów profilu o charakterze losowym. Parametry R_{tm} i R_z są bardzo zbliżone w interpretacji, mają także podobne wartości, parametr R_z jest miarą średniej chropowatości a pojedyncze wgłębienia czy wzniesienia są tylko częściowo uwzględniane, tak więc w przypadku powierzchni ślizgowych lub łożyskowych gdzie pojedyncze wzniesienia profilu nie wpływają na działanie części badanie zmiany tego parametru można uważać za słuszne. Z parametrów określających cechy wzdłużne (horyzontalne) najczęściej stosowanym jest parametr S_m , jego wartość podczas testu w wzrosła podobny sposób jak dla parametrów wysokościowych, największa różnica wystąpiła dla wariantu 4, a najmniejsza dla wariantu 1, dla wariantu trzeciego wielkość ta jest nieco większa niż dla wariantu 2.



Rys. 4. Zmiany wielkości parametrów chropowatości dla wybranych wariantów

Fig. 4. Changes in roughness parameter values for selected variants

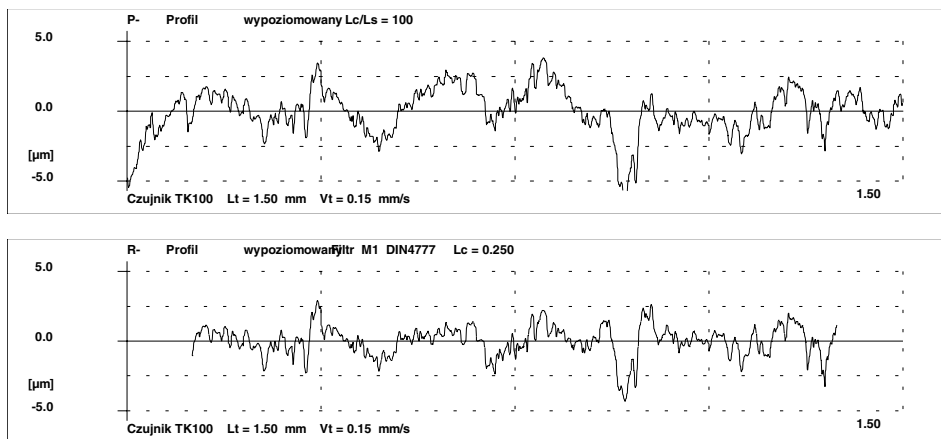
Na zdjęciu powierzchni ślizgowej próbki wykonanym przed testem ściernym wyraźnie widać ukierunkowaną strukturę powstałą w skutek oddziaływania narzędzia na warstwę powierzchniową (**Rys. 5a**). Do charakterystycznych cech struktury geometrycznej powierzchni zużytej można zaliczyć występowanie wgłębień i wzniesień, których kształt i kierunek nie pokrywa się z kierunkiem ruchu trących powierzchni. Prawdopodobną przyczyną powstania takich nierówności mogą być ziarna ścierniwa kruśzące się pomiędzy współpracującymi powierzchniami (**Rys. 5b**).



Rys. 5. Struktura geometryczna powierzchni (SGP) ślizgowej: a) próbki po szlifowaniu pow. ok. 100×, b) próbki po teście (war. 5) pow. ok. 100×

Fig. 5. Geometrical structure of sliding surface: a) samples after grinding, enlargement circa 100×, b) samples after the test enlargement circa 100×

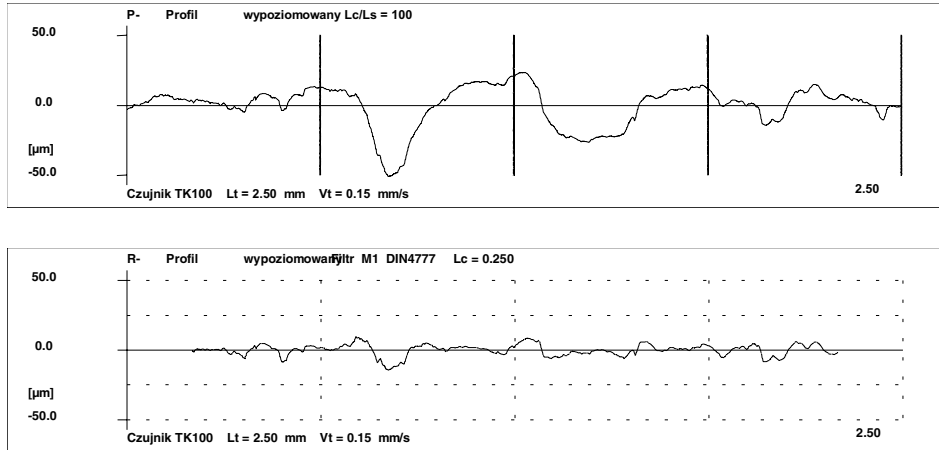
Na **Rysunku 6** oraz **7** przedstawiono profilogramy dla wybranych próbek przed testem i po przeprowadzeniu testu, na górnych rysunkach przed-



Rys. 6. Profilogramy dla wybranej próbki szlifowanej

Fig. 6. Profilograms for selected polished sample

(zwanej także krzywą Abbott'a-Firestona) dla próbki szlifowanej jest nieznacznie większy niż w przypadku próbki zużytej. Pozwala to wnioskować

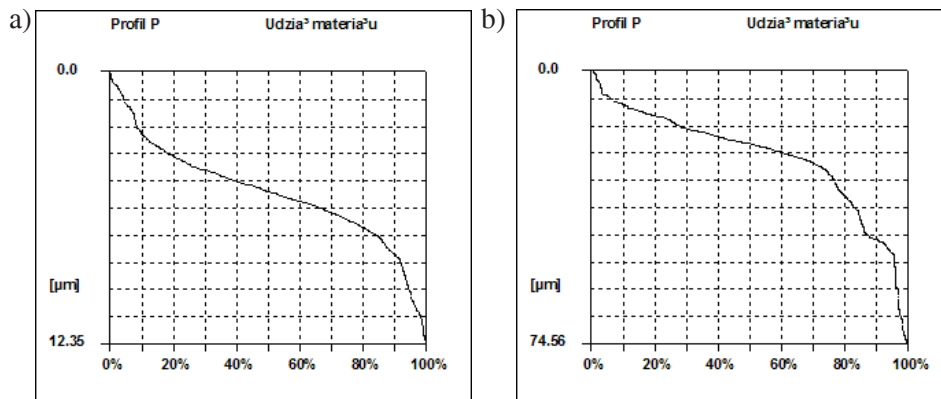


Rys. 7. Profilogramy dla wybranej próbki zużytej

Fig. 7. Profilograms for selected used sample

stawiono profile rzeczywiste, rysunki dolne przedstawiają profile chropowatości z odfiltrowaną falistością.

Na **Rysunku 8a i 8b** przedstawiono profile nośności dla wybranych próbek: szlifowanej i zużytej (wariant 4). Kąt nachylenia krzywej nośności



Rys. 8. Wykres udziału nośnego w funkcji przecięcia: a) dla próbki szlifowanej, b) dla próbki zużytej

Fig. 8. Diagram of bearing fraction in intersection function: a) polished sample b) used sample

wać, że w trakcie procesu zużywania z powierzchni tej zostały usunięte ostre wierzchołki powstałe podczas szlifowania, tworząc łagodne wzniesienia. Wyraźnie też widać różnice udziału nośnego dla przykładowych punktów przecięcia $c = 20\% R_m$ i $c = 50\% R_m$, które odpowiadają dla próbki szlifowanej $t_{p20} = 9\%$, $t_{p50} = 66\%$ oraz dla próbki zużytej $t_{p20} = 28\%$, $t_{p50} = 84\%$, zaznaczając jednocześnie, że wartość R_m (maksymalna wysokość profilu chropowatości) dla próbki zużytej jest ok. 6 razy większe niż w przypadku próbki szlifowanej.

WNIOSKI

Podczas procesu zużywania ścierno-korozyjnego w technologicznej warstwie wierzchniej występują procesy odkształcania wierzchołków chropowatości, ich ścierania, bruzdowania, wskutek czego zostaje ona w znacznym stopniu przekształcona. Jej nowe cechy są wynikiem nałożenia się na stan wyjściowy specyficznych zmian wprowadzonych przez procesy tarcia i korozji. Funkcjonalne zachowanie elementu nie jest zdeterminowane tylko przez jego chropowatość, ale także przez strukturę profilu powierzchni. Powierzchnie bez ostrych wzniesień cechują się lepszą odpornością na ścieranie.

Ponieważ parametry o stosunkowo dużym rozrzucie, takie jak R_a i R_z nie dają informacji o strukturze profilu, należy znaleźć parametry pozwalające na odpowiednie jego scharakteryzowanie. Jest to możliwe przy pomocy parametru t_p na różnych poziomach przekroju profilu.

Z przedstawionych rezultatów pomiarów wynika, że największe różnice chropowatości powierzchni w stosunku do stanu początkowego uzyskano dla wariantu 4, w którym występowało jednoczesne działanie dwóch czynników: ścierniwa i korozji. Uzyskane w tym przypadku wartości parametrów chropowatości są wyraźnie większe od uzyskanych w dwóch oddzielnych procesach (wariant 2 – występowanie tylko korozji i wariant 3 – występowanie tylko ścierniwa). Świadczy to o występowaniu wzajemnej interakcji między procesami ścierania i korozji. Ze szczegółowej analizy wynika, że większy wpływ na zmianę wartości parametrów chropowatości ma ścierniwo (wariant 3) od agresywności korozyjnej środowiska (wariant 2). Najmniejsze zmiany oceny geometrii powierzchni występowały w warunkach oddziaływań czysto tarciovych (tzn. bez udziału ścierniwa i korozji).

LITERATURA

1. Starzyński G., Warstwa wierzchnia i jej modelowanie” VIII seminarium szkoleniowe nt. Nieniszczące badania materiałów, Zakopane 2002.
2. Górecka R., Pogański Z., Podstawy metrologii warstwy wierzchniej, Wybrane problemy trybologiczne, PWN, Warszawa 1990.
3. Nowicki B., Struktura geometryczna: chropowatość i falistość powierzchni, WNT, Warszawa 1991.
4. Nowicki B., Badania mikrostruktury geometrycznej powierzchni i metod jej oceny, Zrzesz. Nauk. P., 70, Warszawa 1980
5. Wieczorowski M., Cellary A., Hajda J., Charakterystyka chropowatości powierzchni, Wydaw. Politechniki Poznańskiej, Poznan 1996.

Recenzent:
Jan BURCAN

Summary

The paper presents changes observed in surface roughness parameters of the sliding surface of steel 45 samples which underwent abrasive-corrosive tests. The obtained values were compared with various type of kinetic junction, profilograms and diagrams of bearing fraction were presented.

Karol NADOLNY*, Przemysław TYCZEWSKI*

**EKSPERYMENTALNE WYNIKI BADAŃ
JEDNOCZESNEGO ZUŻYCIA
MECHANICZNO-ŚCIERNO-KOROZYJNEGO**

**THE EXPERIMENTAL RESULTS OF INVESTIGATIONS
OF SIMULTANEOUS WEAR ABRASIVE CORROSIVE**

Słowa kluczowe:

badania eksperymentalne, zużycie ściernie, korozyjne.

Key word:

experimental investigations, corrosive, abrasive wear.

Streszczenie

W celu poznania relacji ilościowych między skutkami (zużyciowymi), będącymi efektami jednoczesnego działania procesów destrukcyjnych tarciovych i korozyjnych, przy występowaniu oddziaływań fazy stałej pełniącej rolę ścierniwa w węzłach trybologicznych, wykonano eksperymentalne modelowe badania poznawcze.

* Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, Politechnika Poznańska, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań.

Wykonano je z wykorzystaniem zmodernizowanej uniwersalnej maszyny tarciovej. Plan badań oparto na statystycznych metodach planowania doświadczeń wieloczynnikowych. Wyniki eksperymentu przedstawiono w postaci modelu matematycznego przedstawiającego ilościowy opis skutków fizycznie występujących zjawisk i procesów.

WPROWADZENIE

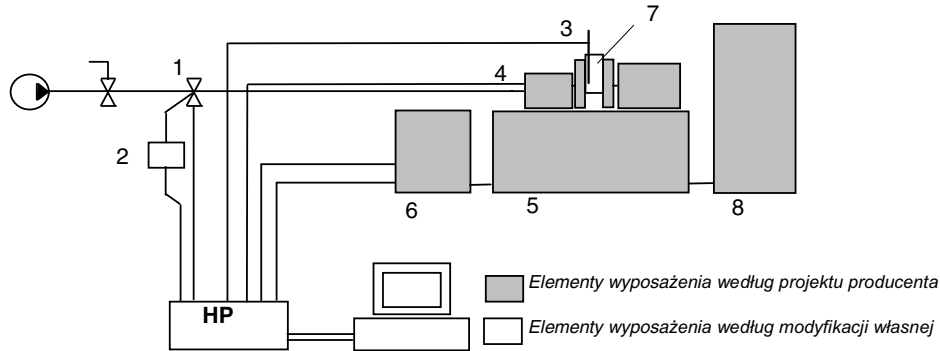
W wielu węzłach maszyn i urządzeń przemysłu spożywczego, występują skutki będące efektem jednoczesnego wpływu destrukcyjnych czynników mechanicznych, ściernych i korozyjnych prowadzące często do ich uszkodzenia. Destrukcyjne procesy mają charakter złożony nie tylko z uwagi na jednoczesne występowanie w obszarze kontaktu kilku procesów zasadniczych o różnej naturze (tribologiczne, korozyjne), ale i na możliwości występowania ich wzajemnego współdziałania, co powoduje, że skutki końcowe są trudne do przewidzenia [L. 1, 2].

Analiza literatury wykazała, iż problematyką jednoczesnego zużywania ścierny – korozyjnego interesowało się wielu badaczy [L. 3–11]. Z uwagi na różnorodne uwarunkowania badań wyniki uzyskane przez poszczególnych autorów nie są w prosty i jednoznaczny sposób porównywalne. Z przeglądu literatury wynika również, że badacze sformułowali przede wszystkim wnioski o charakterze opisowym, jakościowym. Wyraźnie daje się zauważyć brak modeli ilościowych o charakterze kinetycznym umożliwiającym prognozowanie [L. 12].

Zatem celem pracy było poznanie relacji ilościowych między skutkami (zużyciowymi), będącymi efektami jednoczesnego działania procesów destrukcyjnych tarciowych i korozyjnych, przy występowaniu oddziaływań fazy stałej pełniącej rolę ścierniwa w węzłach tribologicznych.

Badania wykonano na zmodernizowanej maszynie tarciovej UMT-2168, według zaproponowanego planu wieloczynnikowego oraz z wykorzystaniem matematycznych metod planowania doświadczeń (**Rysunek 1**) [L. 12].

W efekcie wykonania eksperymentu wieloczynnikowego, zaplanowanego według reguł wynikających z matematycznej teorii planowania doświadczeń, otrzymano model matematyczny przedstawiający ilościowy opis badanego procesu.



Rys. 1. Schemat sterowniczo-pomiarowy maszyny tarcowej UMT-2168: 1 – zawór pneumatyczny zasilaający silownik zadawania obciążenia, 2 – przetwornik ciśnienia, 3 – termopara, 4 – przetwornik momentu tarcia, 5 – układ napędowy, 6 – prądnicza tachometryczna, 7 – komora badawcza, 8 – szafa sterownicza

Fig. 1. Control and measurement scheme of the friction machine UMT-2168: 1 – pneumatic valve feeding the loading motor operator, 2 – pressure transducer, 3 – thermocouple, 4 – friction moment transducer, 5 – driving system, 6 – tachogenerator, 7 – test chamber, 8 – control box

STATYSTYCZNY PLAN EKSPERYMENTU

Do analizy wyników tribologicznego eksperymentu wieloczynnikowego, postanowiono wykorzystać możliwości matematycznych metod planowania eksperymentów [L. 13, 14]. Wykorzystano oprogramowanie CADEX „Planowanie i analiza statystycznych badań doświadczalnych z zastosowaniem planów statycznych zdeterminowanych” [L. 15]. Wybrano plan statyczny zdeterminowany poliselekcyjny ortogonalny. Plan ten w odniesieniu do innych możliwych do przyjęcia planów badań, zapewnia maksymalne uproszczenie obliczeń współczynników modelu i ich ocenę statystyczną [L. 14]. Stwarza możliwości dokładnego opisu obiektu badań umożliwiającą rozszerzenie stosowania opracowanego modelu poza przyjęty zakres zmiennych czynników bez potrzeby wykonywania dodatkowych czasochłonnych badań.

W badaniach uwzględniono cztery czynniki wejściowe, które zmieniły się na czterech poziomach. Tym samym w celu przeprowadzenia pełnych badań należałoby wykonać 256 doświadczeń z pięcioma powtórzeniami, co daje 1280 doświadczeń. Po zastosowaniu planowania matematycznego (wg planu ortogonalnego) liczba koniecznych pomiarów wyniosła 125 (25 doświadczeń z pięcioma powtórzeniami) [14]:

$$N = 2^S + S \times 2 + N_0, \quad (1)$$

gdzie: N – liczba doświadczeń, S – liczba czynników wejściowych, N_0 – liczba doświadczeń centralnych.

Zdecydowano się na weryfikację ogólnego modelu ortogonalnego II rzędu w postaci:

$$I = b_0 + \sum_{i=1}^4 b_i X_i + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^4 b_{ii} X_i^2 \quad (2)$$

gdzie: b_{ij} – współczynniki, X_{ij} – zmienne zakodowane.

Do modelu matematycznego przyjęto oznaczenia:

Czynniki wejściowe:

x_1 – liczba obrotów [obr/min], $0 < x_1 < 150$,

x_2 – siła nacisku [N], $0 < x_2 < 40$,

x_3 – wielkość ziaren [mm], $0 < x_3 < 0,3$,

x_4 – skład środowiska [%], $0 < x_4 < 8$.

Czynnik wyjściowy:

I – zużycie wagowe [g].

Opracowany model matematyczny będzie, więc obowiązywać dla następującego zakresu zmienności czynników badanych:

x_1 : $n = 0-150$, x_2 : $P = 0-40$,

x_3 : $d = 0-0,3$, x_4 : $m = 0-8$.

Obliczając wartości centralne oraz jednostki zmienności otrzymano wartości zmiennych zakodowanych wraz z odpowiadającymi im wartości (Tabela 1) [L. 12].

Tabela 1. Obliczone wartości centralne, jednostki zmienności oraz wartości zmiennych zakodowanych

Table 1. Central values, individual of changeability as well as value of variables coded

Czynniki badane		Wartość centralna	Jednostka zmienności	Kod				
Zmienna naturalna	Zmienna zakodowana			$-\alpha = -1,4124$	-1	0	+1	$+\alpha = 1,4124$
n	X_1	75	37,5	0	37,5	75	112,5	150
P	X_2	20	10	0	10	20	30	40
d	X_3	0,1	0,5	0	0,05	0,1	0,2	0,3
m	X_4	4	2	0	2	4	6	8

Program badań przedstawiono w **Tabeli 2 [L. 12]**.

Tabela 2. Program badań [12]

Table 2. Program of investigations [12]

Nr doświadczenia	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
1	1	37,5	10	0,05	2
2	1	112,5	10	0,05	2
3	1	37,5	30	0,05	2
4	1	112,5	30	0,05	2
5	1	37,5	10	0,1	2
6	1	112,5	10	0,1	2
7	1	37,5	30	0,1	2
8	1	112,5	30	0,1	2
9	1	37,5	10	0,05	6
10	1	112,5	10	0,05	6
11	1	37,5	30	0,05	6
12	1	112,5	30	0,05	6
13	1	37,5	10	0,1	6
14	1	112,5	10	0,1	6
15	1	37,5	30	0,1	6
16	1	112,5	30	0,1	6
17	1	0	20	0,2	4
18	1	150	20	0,2	4
19	1	75	0	0,2	4
20	1	75	40	0,2	4
21	1	75	20	0	4
22	1	75	20	0,3	4
23	1	75	20	0,2	0
24	1	75	20	0,2	8
25	1	75	20	0,2	4

WYNIKI BADAŃ

Z pośród wielu możliwych do zastosowania formalnych modeli regresyjnych (liniowych, liniowo – kwadratowo – interakcyjnych, liniowo potęgowych itp.) w rozważanym zagadnieniu zastosowano drugi z wymienionych.

Wybór ten był podyktowany wstępną oceną siły więzi korelacyjnej współczynnika korelacji wielowymiarowej R. Otrzymane wyniki były najkorzystniejsze dla modelu liniowo – kwadratowego ze składnikami interakcyjnymi.

Zatem w niniejszym eksperymencie założono, iż weryfikowany wstępnie model przyjmie postać:

$$I = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{44}x_4^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4, \quad (3)$$

Przeprowadzenie wiarygodnej weryfikacji wymagało pozyskania reprezentatywnej próby wyników z badań.

Zbiorcze zestawienie wartości parametrów badań dla poszczególnych wariantów wraz ze średnimi wartościami zużycia przedstawiono w **Tabeli 3**.

Tabela 3. Zbiorcze wyniki z badań według planowania statystycznego

Table 3. Results with investigations according to facing statistical

n			P		d	m	Mt _{sr}	ΔMt _{sr}	I	ΔI	
Zadana	rzeczywista	v	zadana	rzeczywista						g	g
obr/min	obr/min	m/s	N	N	mm	%	Nm	Nm	g	g	%
38	24	0,030	10	11	0,05	2	0,516	0,069	0,0179	0,0014	8
113	110	0,139	10	11	0,05	2	0,930	0,104	0,0189	0,0015	8
38	24	0,031	30	31	0,05	2	1,606	0,090	0,0199	0,0017	8
113	110	0,138	30	30	0,05	2	2,785	0,097	0,0219	0,0021	9
38	23	0,029	10	11	0,1	2	0,791	0,089	0,0202	0,0013	7
113	110	0,142	10	11	0,1	2	1,410	0,096	0,0220	0,0018	8
38	23	0,028	30	30	0,1	2	2,767	0,242	0,0249	0,0021	9
113	110	0,139	30	30	0,1	2	3,325	0,148	0,0254	0,0025	10
38	25	0,032	10	11	0,05	6	0,460	0,075	0,0259	0,0022	9
113	110	0,138	10	10	0,05	6	0,852	0,119	0,0293	0,0026	9
38	25	0,031	30	30	0,05	6	1,643	0,04	0,0322	0,0026	8
113	110	0,141	30	30	0,05	6	2,355	0,124	0,0329	0,0027	8
38	24	0,031	10	11	0,1	6	0,695	0,059	0,0280	0,0028	10
113	110	0,142	10	11	0,1	6	1,768	0,242	0,0298	0,0030	10
38	24	0,030	30	30	0,1	6	1,967	0,092	0,0324	0,0028	9
113	110	0,142	30	30	0,1	6	2,959	0,083	0,0357	0,0027	8
0	0	0,000	20	20	0,2	4	-	-	0,0059	0,0005	8
150	140	0,178	20	20	0,2	4	3,950	0,197	0,0492	0,0032	6
75	80	0,100	0	0	0,2	4	-	-	0,0063	0,0005	8
75	78	0,099	40	40	0,2	4	4,767	0,242	0,0542	0,0016	3
75	80	0,100	20	20	0	4	1,133	0,108	0,0101	0,0010	10
75	79	0,101	20	20	0,3	4	2,920	0,133	0,0520	0,0070	13
75	79	0,099	20	21	0,2	0	2,414	0,212	0,0171	0,0018	10
75	79	0,100	20	20	0,2	8	2,291	0,128	0,0541	0,0029	5
75	79	0,099	20	21	0,2	4	2,020	0,133	0,0492	0,0054	11

Dla poszczególnych układów z planu, obliczono następujące parametry statystyczne: średnią arytmetyczną w próbce, najmniejszą i największą wartość w próbce, rozstęp w próbce, wariancję w próbce, odchylenie standardowe w próbce, estymator wariancji populacji σ^2 , estymator odchylenia

nie standardowego populacji σ , odchylenie standardowe średnich arytmetycznych z próbek o liczności r , odchylenie przeciętne, współczynnik skośności (asymetria) oraz współczynnik spłaszczenia (ekseces) w próbce.

Wariancja niedokładności pomiarów obliczona została na podstawie wszystkich wyników 25 układów planu, które to badania powtórzono pięciokrotnie i dla wartości wielkości wyjściowej wynosi $S^2(z) = 6,588 \cdot 10^{-5}$.

Dla weryfikacji jednorodności wariancji w układach planu doświadczenia, przeprowadzono test Bartletta. Dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0,05$ i stopni swobody $f = n - 1 = 24$ wyznaczono wartość krytyczną $\chi^2 = 299,9$ oraz $\chi^2(\alpha) = 36,41$. Z uwagi, iż $\chi^2 \geq \chi^2(\alpha)$ wynik testu Bartletta jest negatywny. Uzyskany rezultat świadczy o tym, iż w praktyce rozproszenie wyników zużycia dla różnych wariantów metodycznych realizowanego eksperymentu jest istotnie zróżnicowane.

Do aproksymacji funkcji obiektu badań, wybrano wielomian algebraiczny (liniowo – kwadratowo – interakcyjny). Dla ułatwienia obliczeń w celu znalezienia powiązań między czynnikami wejściowymi, a czynnikiem wyjściowym (zużyciem) wprowadzono nowe zmienne kodowane (unormowane) X_i . Nowa postać modelu to:

$$F(I) = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 + b_{44}X_4^2 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{14}X_1X_4 + b_{23}X_2X_3 + b_{24}X_2X_4 + b_{34}X_3X_4 \quad (4)$$

W wyniku przeprowadzonych badań ustalono wartości poszczególnych współczynników.

Zatem funkcja aproksymująca (w zmiennych zakodowanych) przedstawia się następująco:

$$F(I) = 0,04370 + 0,00379X_1 + 0,00506X_2 + 0,00267X_3 + 0,00638X_4 - 0,00738X_1^2 - 0,00602X_2^2 - 0,00118X_3^2 - 0,00338X_4^2 - 0,00010X_1 \times X_2 + 0,00002X_1 \times X_3 + 0,00025X_1 \times X_4 + 0,00023X_2 \times X_3 + 0,00044X_2 \times X_4 - 0,00052X_3 \times X_4 \quad (5)$$

Błędy aproksymacji, czyli relacje między wartościami wielkości wyjściowych (I) stanowiące wyniki pomiarów, a odpowiednimi aproksymowanymi wartościami wielkości wyjściowych (\hat{I}) obliczonymi z wyznaczonej funkcji aproksymacji, przedstawiają się następująco [L. 15]:

- maksymalny błąd bezwzględny $DI_{\max} = 0,01819$ [g],
- błąd przeciętny $d = 0,006791$ [g],

– błąd średniokwadratowy $M = 0,008523$ [g].

Wartość współczynnika korelacji wielowymiarowej $R = 0,77$.

Wykorzystując relacje normowania dokonano odkodowania zmiennych.

$$\begin{aligned}
 I = & -0,016901 + 0,000470x_1 + 0,001506x_2 + 0,060152x_3 + 0,005548x_4 - \\
 & -0,000003x_1^2 - 0,000030x_2^2 - 0,104698x_3^2 - 0,000422x_4^2 - \\
 & -0,0000001x_1 \times x_2 + 0,000004x_1 \times x_3 + 0,000002x_1 \cdot x_4 + \\
 & + 0,000153x_2 \cdot x_3 + 0,000011x_2 \cdot x_4 - 0,0017175x_3 \cdot x_4.
 \end{aligned} \quad (6)$$

Dla weryfikacji istotności poszczególnych współczynników w modelu zastosowano test t-Studenta. Na podstawie danych wejściowych:

– wariancja niedokładności $S^2(z) = 6,588 \cdot 10^{-5}$,

– stopnie swobody $f_1 = 100$,

– poziom istotności $\alpha = 0,05$,

– wartość krytyczna $t_{(\alpha)} = t_{(0,05)} = 1,984$,

obliczono dla poszczególnych współczynników b_j odchylenie standardowe $S(b_j)$ oraz wartość statystyki testu $t(b_j)$ [15].

Wyniki weryfikacji istotności za pomocą testu t-Studenta przyjmuje się jako istotny jeżeli $t(b_j) > t(\alpha)$ lub jako nieistotny gdy $t(b_j) \leq t(\alpha)$. Ustalono, że nieistotne współczynniki w modelu (6) są następujące:

$$\begin{aligned}
 b_{12} &= -0,00010, & b_{13} &= 0,00002, \\
 b_{14} &= 0,00025, & b_{23} &= 0,00023, \\
 b_{24} &= 0,00044, & b_{33} &= -0,00118, \\
 b_{34} &= -0,00052.
 \end{aligned}$$

Należało, zatem zaproponować nowy model, bez współczynników nieistotnych.

Nowy model w postaci ogólnej przedstawia się następująco:

$$F(I) = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{44}X_4^2. \quad (7)$$

Zatem funkcja aproksymująca obiekt badań (w zmiennych zakodowanych) przedstawia się następująco:

$$\begin{aligned}
 F(I) = & 0,04276 + 0,00379X_1 + 0,00506X_2 + 0,00267X_3 + \\
 & + 0,00638X_4 - 0,00738X_1^2 - 0,00602X_2^2 - 0,00338X_4^2.
 \end{aligned} \quad (8)$$

Błędy aproksymacji, czyli relacje między wartościami wielkości wyjściowych (I) stanowiące wyniki pomiarów, a odpowiednimi aproksymowanymi wartościami wielkości wyjściowych (\hat{I}) obliczonymi z wyznaczonej funkcji aproksymacji, przedstawiają się następująco [15]:

- maksymalny błąd bezwzględny: $\Delta I_{\max} = 0,01725$ [g],
- błąd przeciętny: $d = 0,00689$ [g],
- błąd średniokwadratowy: $M = 0,00857$ [g].

Natomiast współczynnik korelacji wielowymiarowej R wynosi: 0,7640.

Wykorzystując relacje normowania zastąpiono zmienne zakodowane, otrzymując równanie opisujące zmienność zużycia całkowitego w przypadku jednoczesnego oddziaływania wymuszeń mechanicznych, ściernych i korozyjnych.

$$I = -0,016128 + 0,000465x_1 + 0,001563x_2 + 0,025209x_3 + 0,0056329x_4 - 0,000003x_1^2 - 0,000030x_2^2 - 0,000422x_4^2 \quad (9)$$

Początkowy model – wielomian aproksymacyjny dla rozważnych czterech zmiennych (x_1, \dots, x_4) obejmował 15 składników. Obliczona wartość współczynnika korelacji wynosiła 77%. Wykorzystując test t-Studenta dokonano formalnej oceny istotności wpływu współczynników przy zmiennych decyzyjnych i ich kombinacji w badanym modelu. Wyniki obliczeń wykazały, że przy obniżeniu wartości współczynnika korelacji do 76% można było model uprościć do postaci ośmiuoskładnikowego wielomianu (równanie 8). Z analizy postaci tego równania wynika, że wstępne arbitralne wybranie zmiennych decyzyjnych (prędkość obrotowa, naciski, wymiary ścierniwa, stężenie medium korozyjnego) było uzasadnione, gdyż wszystkie zmienne (x_1, \dots, x_4) występują w modelu. Ocena wpływu zmian wartości zmiennych decyzyjnych na całkowite zużycie jest trudna, jeśli rozważa się model w ostatecznej postaci (9). Do sformułowania wniosków wygodniej jest przeanalizować ten sam model w postaci zawierającej zmienne unormowane (8).

WNIOSKI

Sformułowano następujące wnioski szczegółowe:

- a. wszystkie wybrane zmienne wchodzą do modelu i są istotne,
- b. zmienne decyzyjne (naciski, prędkość, stężenie) występują zarówno w postaci składników w pierwszej potędze, jak i drugiej (ale ze znakiem ujemnym),

c. tylko zmienna x_3 (ścierniwo) jest składnikiem liniowym w modelu.

Z analizy sformułowanych spostrzeżeń szczegółowych wynika, że dominujący wpływ na zużycie całkowite w opisywanym złożonym przypadku jednoczesnego zużywania tribologicznego i korozyjnego mają oddziaływania ściernie.

LITERATURA

1. Nadolny K., Tyczewski P., Specyfika zużywania elementów urządzeń w cukrowniach. XXII Jesienna Szkoła Tribologiczna. Materiały konferencyjne. Ustroń 1998, s. 233–238.
2. Nadolny K., Tyczewski P., Czynniki wpływające na zużycie cierne i korozyjne w maszynach przemysłu cukrowniczego Mat. konf. IX konferencja naukowo-techniczna Budowa i eksploatacja maszyn przemysłu spożywczego, Opole 2000.
3. Преис Г.А., Сологуб Н.А., Некоз А.И.: Повышение износостойкости оборудования пищевой промышленности, Машиностроение, Москва, 1979.
4. Watson S.W., Friedersdorf F.J., Madsen B.W., Cramar S.D., Methods of measuring wear – corrosion synergism, *Wear*, 181–183 (1995) 476–484.
5. Batchelor A.W., Stachowiak G.W., Predicting synergism between corrosion and abrasive wear, *Wear*, 123 (1988) 281–291.
6. Kotlyar D.C., Pitt C.H., Wadsworth M.E., Simultaneous corrosion and abrasion measurements under grinding conditions, *Corrosion*, 44 (1988) 221–228.
7. Madsen B.W., Standard guide for determining amount of synergism between wear and corrosion, ASME G119 – 93, 1994, Ann. Book ASTM Stand., Vol. 03.02, Wear and Erosion, Metal Corrosion, ASTM, Philadelphia, PA, 1994, pp. 507–512.
8. Assi F., Böhni H., Study of wear – corrosion synergy with a new microelectrochemical technique, *Wear*, 233–235, 1999, 505–514.
9. Zhang T.C., Jiang X.X., Li S.Z., Lu X.C., A quantitative estimation of the synergy between corrosion and abrasion, *Corrosion Science*, Vol. 36, No. 12, 1994, 1953–1962.
10. Nadolny K., Tyczewski P., Experimental study of process abrasive – corrosive, *Functional Surfaces*, Trencin, 2002.
11. Pitt C.H., Chang Y.M., Wadsworth M.E., Kotlyar D., Laboratory abrasion and electrochemical test methods as a means of determining mechanism and rates of corrosion and wear in ball mills, *Int. J. Miner. Process.*, 22 (1988) 361–380.

12. Tyczewski P., Rozprawa doktorska Politechnika Poznańska 2002
13. Kacprzyński B., Planowanie eksperymentów. Podstawy matematyczne. WNT, Warszawa, 1974.
14. Mańczak K., Technika planowania eksperymentu, WNT, 1976.
15. Polański Z., Górecka-Polańska R., Program CADEX. Planowanie i analiza statystyczna badań doświadczalnych z zastosowaniem planów statystycznych zdeterminowanych, Wyd. CERMET, Kraków, 1992.

Recenzent:
Jan BURCAN

Summary

It in aim of meeting of quantitative reports between wear, the being effect of simultaneous working of destructive frictional processes and corrosive, near occurrence of influences of solid fulfilling the part of abrading winding phase, the experimental cognitive investigations were executed was.

It was executed from utilization in proposed model conditions universal frictional machine engine. The plan of investigations was based on statistical methods the facing of multifactorial experiences. The results of experiment were introduced in the figure of mathematical patterned representative the quantitative description the physically occur-rent phenomena and processes.

Antoni NEYMAN*, Paweł ROMANOWSKI*, Leszek DĄBROWSKI*

WĘZŁY CIERNE STABILIZATORA POLA OPERACYJNEGO SERCA

FRICITION JOINTS OF SURGICAL AREA HEART STABILIZER

Słowa kluczowe:

operacje naczyń wieńcowych, mechaniczna stabilizacja pola operacyjnego, węzły cierne.

Key words:

surgical operations of coronary vessels, mechanical stabilisation of surgical area, friction joints.

Streszczenie:

W wyniku współpracy pomiędzy Katedrą Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Gdańskiej i Instytutem Kardiologii Akademii Medycznej w Gdańsku skonstruowano pierwszy w Polsce i w Europie stabilizator pola operacyjnego na pracującym sercu, urządzenie niezbędne do prowadzenia operacji kardiologicznych bez włączania krążenia pozaustrojowego.

* Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, Katedra Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn

wego. Urządzenie to poprzez chwytak z parą przyssawek unosi serce i unieruchamia powierzchnię pomiędzy przyssawkami ograniczając przemieszczenia wynikające z pulsacji serca do wartości poniżej 1 mm. Wykonany w Gdańsku stabilizator potwierdził pełną przydatność jako urządzenie umożliwiające przeprowadzanie operacji „pomostowania” naczyń wieńcowych na pracującym sercu. Przeprowadzono badania doświadczalne oporów ruchu w węzłach ciernych stabilizatora oraz numeryczną analizę sztywności jego struktury. Oszacowane na podstawie wyników badań wartości współczynnika tarcia w przegubach stabilizatora zawierały się w granicach 0,17 do 0,42. Badania wykazały wystarczającą sztywność i pewność działania stabilizatora.

WSTĘP

Rozpowszechnienie chorób układu krążenia powoduje konieczność wykonywania zabiegów kardiologicznych (w Polsce rocznie ok. 20 tysięcy). Powszechnie jest wykonywane operacyjne pomostowanie tętnic wieńcowych. Takich zabiegów wykonuje się rocznie w Polsce ok. 10 tysięcy. Przeprowadzanie takich zabiegów, bez włączenia krążenia pozaustrojowego, jest bardzo korzystne dla pacjenta, zmniejsza ryzyko operacji i przyspiesza rekonwalescencję oraz zdecydowanie obniża koszt operacji. Koszt jednorazowego użycia sztucznego płuco-serca wynosi bowiem ok. 1500 USD. Do przeprowadzenia zabiegów operacyjnych bez krążenia pozaustrojowego niezbędne jest unieruchomienie części powierzchni serca podlegającej zabiegowi (w celu zmniejszenia amplitudy ruchów), przy pomocy specjalnych urządzeń mechanicznych (stabilizatorów), mocowanych do stołu lub do tzw. rozwieracza mostka.

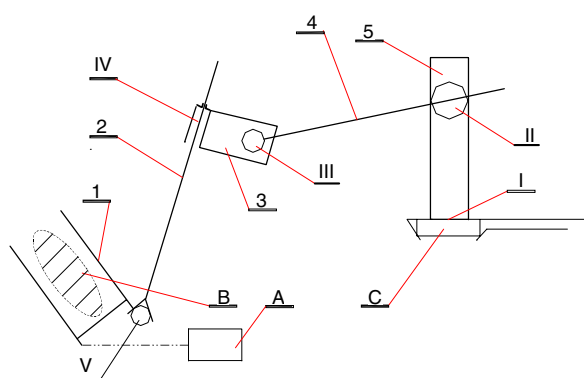
W Ameryce i Europie Zachodniej stosowany jest stabilizator firmy MEDTRONIC (Medtronic Octopus Tissue Stabilization Unit). Urządzenie to ze względu na wysoki koszt (jednorazowe użycie ok. 800 USD) nie jest powszechnie dostępne w polskiej kardiologii. Urządzenie to stabilizuje pole operacyjne poprzez ucisk serca, co nie jest korzystne ze względów medycznych. Od roku 2000 trwają na Wydziale Mechanicznym Politechniki Gdańskiej i w Klinice Kardiologii IK AM w Gdańsku badania nad stabilizatorem własnej konstrukcji. Powstały prototypy stabilizatora [L. 1, 2], które po serii badań opatentowano i wprowadzono do użytku klinicznego [L. 3, 4]. Do chwili obecnej wykonano ponad 500 operacji na pracującym sercu wykorzystując te właśnie stabilizatory. Są to jedyne urządzenia tego

typu konstruowane, wyprodukowane i wprowadzone do użytku klinicznego w Polsce i w Europie. Wyniki leczenia chirurgicznego są porównywalne do danych publikowanych z ośrodków w Europie zachodniej i Ameryce [L. 5, 6]. Urządzenie polskie działa na zasadzie unoszenia serca poprzez przyssawki podłączone do pompy próżniowej, co jest medycznie korzystniejsze.

Koszt jednorazowego użycia urządzenia wykonanego w Politechnice Gdańskiej wynosi ok. 100 zł. Wprowadzenie do powszechnego użytku taniego polskiego urządzenia rozwiązałoby nie tylko problem ekonomiczny, ale także poważny problem społeczny, znacznie zwiększając dostępność zabiegów na pracującym sercu, bez włączania krążenia pozaustrojowego.

KONSTRUKCJA STABILIZATORA GDAŃSKIEGO

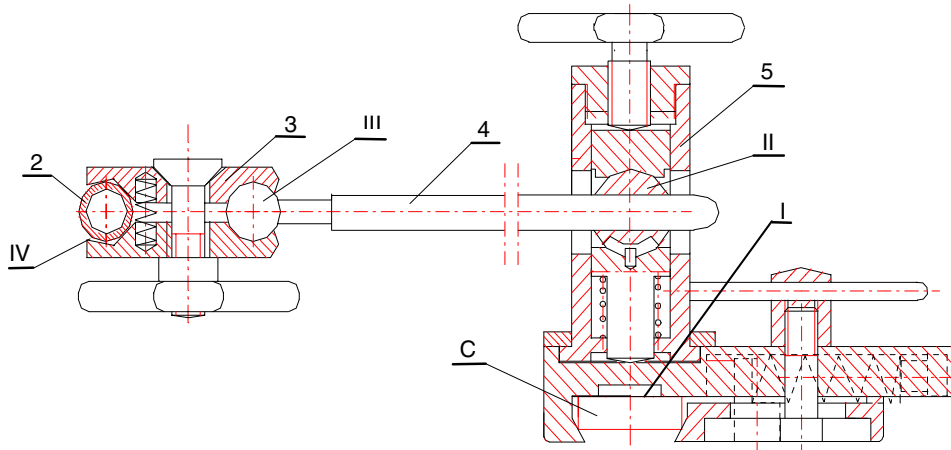
Podstawowe problemy konstrukcyjne, jakie trzeba było rozwiązać to zapewnienie sztywności całego układu w tym szczególnie przegubów ciernych niezbędnych dla zapewnienia wymaganej liczby stopni swobody urządzenia. Sztywność tą należało zapewnić przy możliwie małych wymiarach urządzenia, takich aby nie utrudniały dostępu do pola operacyjnego na pracującym sercu. Dodatkowym wymaganiem była łatwość demontażu urządzenia na poszczególne elementy tak, aby można było poddać je sterylizacji. Opracowując konstrukcję polskiego stabilizatora wykonano kilka prototypów. Schemat najnowszej wersji stabilizatora przedstawiono na **Rys. 1**. Na **Rysunkach 2 i 3** przedstawiono zasadnicze zespoły stabilizatora zaś na **Rys. 4** zdjęcie stabilizatora.



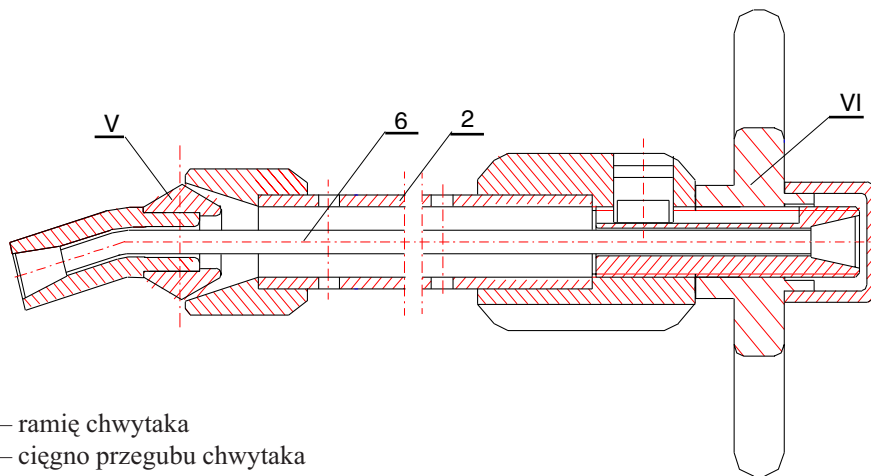
I – zacisk statywu na rozwieraczu mostka, II – przegub kulisty statywu, III – przegub kulisty uchwyty, IV – przegub walcowy ramienia chwytaka, V – przegub kulisty chwytaka, VI – zacisk ciągną ramienia chwytaka; 1 – chwytak, 2 – ramię chwytaka, 3 – uchwyt szczękowy ramienia, 4 – ramię statywu, 5 – statyw
A – pompa ssąca, B – pole operacyjne serca, C – prowadnica rozwieracza mostka

Rys. 1. Schemat stabilizatora gdańskiego

Fig. 1. Scheme of the gdańsk stabilizer

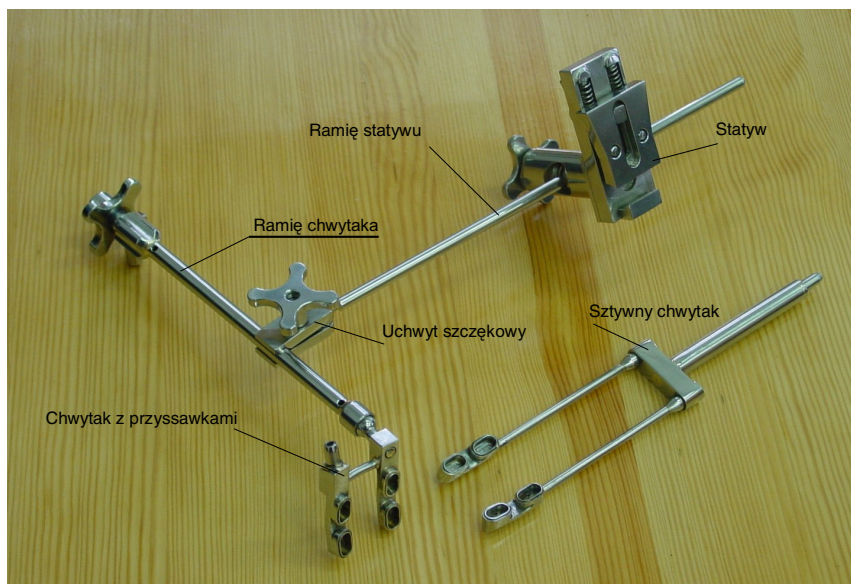


Rys. 2. Szkic konstrukcyjny statywu z ramieniem i uchwytem szczękowym
 Fig. 2. Design sketch of stand with arm and clamp holder



2 – ramię chwytaka
 6 – ciągnio przegubu chwytaka

Rys. 3. Szkic konstrukcyjny ramienia chwytaka
 Fig. 3. Design sketch of holder arm

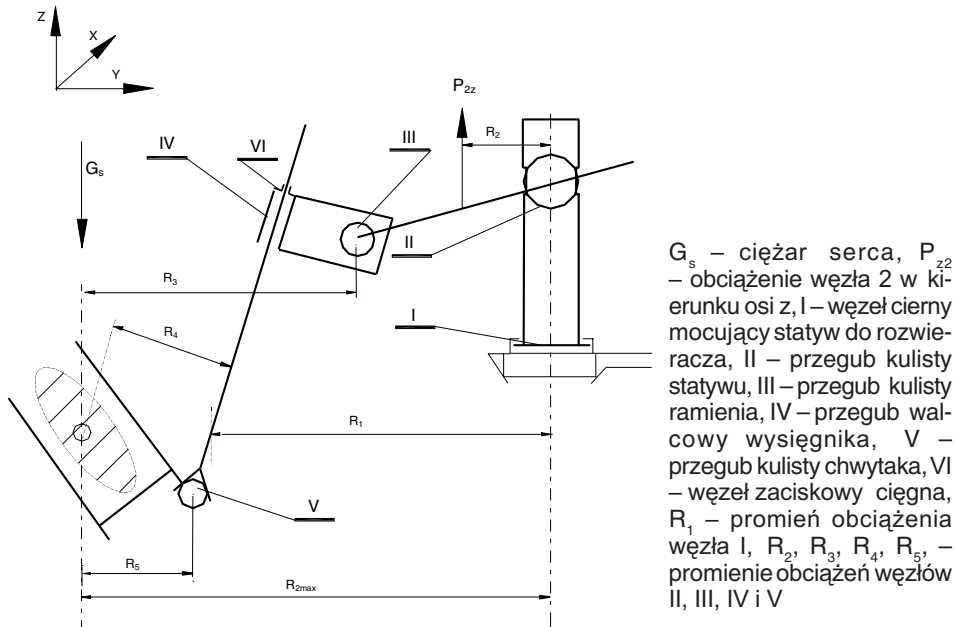


Rys. 4. Zdjęcie stabilizatora „gdańskiego”

Fig. 4. Image of gdańsk stabilizer

BADANIA OPORÓW TARCIA W PRZEGUBACH STABILIZATORA

W celu sprawdzenia pewności działania węzłów ciernych stabilizatora przeprowadzono badania oporów tarcia we wszystkich jego przegubach. W określonej odległości od środka każdego z przegubów przykładano siłę przy użyciu dynamometru zwiększając ją aż do uzyskania początku poślizgu. Wyniki pomiarów podano w **Tabelach 1 i 2**. Schemat układu pomiarowego wyjaśniający oznaczenia podane w tabelach przedstawiono na **Rys 5**.



Rys. 5. Schemat układu do pomiaru oporów tarcia w węzłach stabilizatora serca

Fig. 5. Scheme of the stand for friction torque measurement in heart stabilizer joints

Tabela 1. Wartości obciążeń wywołujących poślizg w przegubach i odpowiadające im szacowane wartości współczynników tarcia (moment dokręcenia przegubów 0,8Nm)

Table 1. Values of loads causing slip in joints and corresponding values of estimated friction coefficient values (screw moment 0,8Nm)

Węzeł cierny I			Przegub III			Przegub IV			Przegub V		
R_{1x}	P_{1x}	μ	R_{3x}	P_{3x}	μ	R_{4x}	P_{4x}	μ	R_{5x}	P_{5x}	μ
[mm]	[N]		[mm]	[N]		[mm]	[N]		[mm]	[N]	
100	60	0,30	100	20	0,40	50	20	0,20	140	7,5	0,21
150	41	0,31	150	13	0,39	60	18	0,22	100	11	0,22
150	45	0,34	100	19	0,38	60	17	0,20	100	12	0,24

Przegub II			Przegub III			Przegub V		
R_{2z}	P_{2z}	μ	R_{3z}	P_{3z}	μ	R_{5z}	P_{5z}	μ
[mm]	[N]		[mm]	[N]		[mm]	[N]	
100	60	0,40	100	18	0,36	100	13	0,26
150	42	0,42	150	12	0,36	150	8	0,24
100	62	0,41	100	17	0,34	150	9	0,27

Tabela 2. Wartości obciążeń wywołujących poślizg w przegubach i odpowiadające im szacowane wartości współczynników tarcia (moment dokręcenia przegubów 0,4Nm)

Table 2. Values of loads causing slip in joints and corresponding values of estimated friction coefficient values (screw moment 0,4Nm)

Węzeł cierny I			Przegub III			Przegub IV			Przegub V		
R _{1x}	P _{1x}	μ	R _{3x}	P _{3x}	μ	R _{4x}	P _{4x}	μ	R _{5x}	P _{5x}	μ
[mm]	[N]		[mm]	[N]		[mm]	[N]		[mm]	[N]	
100	35	0,35	100	10	0,40	60	7	0,17	140	5	0,28
150	22	0,33	150	7	0,42	50	10	0,20	100	8	0,32
150	21	0,31	100	12	0,48	50	10	0,20	120	7,2	0,34

Przegub II			Przegub III			Przegub V		
R _{2z}	P _{2z}	μ	R _{3z}	P _{3z}	μ	R _{5z}	P _{5z}	μ
[mm]	[N]		[mm]	[N]		[mm]	[N]	
100	24	0,32	100	11	0,44	100	9	0,36
150	18	0,36	150	8	0,48	150	7	0,42
100	25	0,33	150	7	0,42	100	10	0,40

Pomiary przeprowadzono przy dwóch wartościach momentu dokręcającego złącza śrubowe M6, zaciskające przeguby. Wartość maksymalna ok. 0,8 Nm, wartość minimalna ok. 0,4 Nm. Przy założonej wartości współczynnika tarcia $\mu = 0,2$; obliczona siła docisku śruby M6, wywołana momentem dokręcającym o wartości 0,8 Nm, wynosi ok. 1000 N. Przy takiej wartości siły docisku moment tarcia w przegubie kulistym II (średnica 15 mm) powinien wynosić ok. 3Nm. Rzeczywisty, pomierzony moment tarcia odpowiadający początkowi poślizgu w przegubie wynosił ok. 6 Nm (**Tabela 1**). Oznacza to, że rzeczywisty współczynnik tarcia w przegubie wynosił ok. 0,4.

Podobna sytuacja wystąpiła przy wartości momentu dokręcenia 0,4 Nm (**Tabela 2**). Średnice przegubów III, IV, i V wynoszą po 10 mm. Pomierzone wartości momentów tarcia, odpowiadające początkowi poślizgu, były znacznie zróżnicowane, zbliżone do obliczonych lub większe.

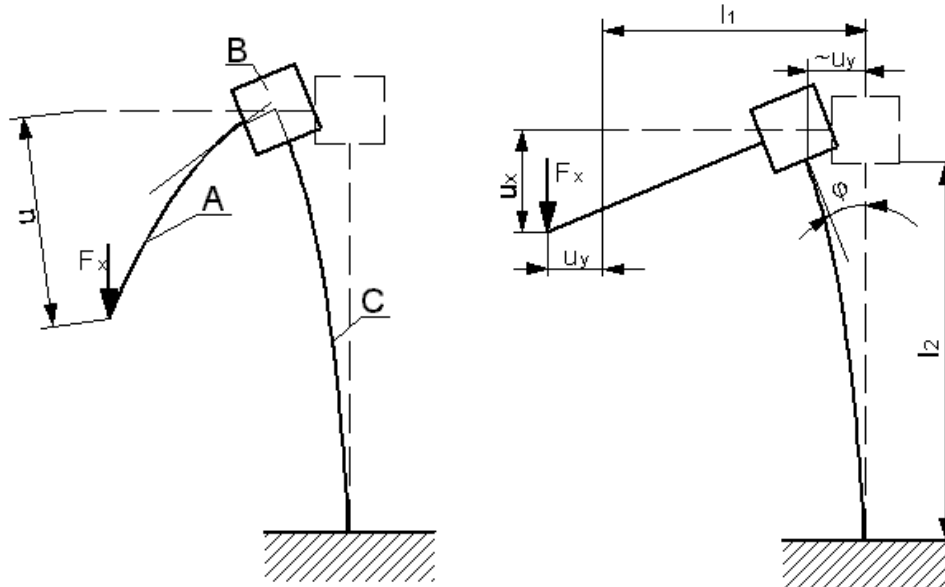
Analiza wyników pomiarów wskazuje na dwa ciekawe spostrzeżenia. Po pierwsze rzeczywiste wartości współczynników tarcia okazały się duże, często znacznie większe od spodziewanych. Po drugie stwierdzono znaczne zróżnicowanie wartości współczynników tarcia wynikających

z mierzonych wartości momentów, w różnych przegubach wykonanych z tego samego materiału, stali nierdzewnej. Po trzecie małe rozrzuty i małe wartości współczynników tarcia wystąpiły w przegubie IV. Małe rozrzuty wartości współczynnika tarcia wykazał też węzeł cierny I. Można to wytłumaczyć wpływem dokładności wykonania poszczególnych węzłów na wartość momentu potrzebną do wywołania poślizgu w przegubie. W węźle ciernym I mamy do czynienia ze stykiem płaskim. Możliwość uzyskania dokładnej obróbki jest tu znacznie większa niż w przypadku kuli (przeguby II i III). Przegub IV – walcowy jest także znacznie łatwiejszy w uzyskaniu dokładnej obróbki – małych błędów kształtu. W przypadku węzłów kulistych błędy wykonania kul powodują z jednej strony, że złącze staje się w pewnej mierze kształtowo ciernie, a wpływ błędów kształtu na wartość momentu poślizgu uzależniony jest od ustawienia kuli w uchwycie. W tym przypadku, kiedy potrzebna jest tylko samonastawność montażowa przegubów, w momencie ustawiania chwytaka i dostosowania jego położenia do pola operacyjnego, przed zaciśnięciem przegubów, dokładność wykonania kul przegubów nie ma istotnego znaczenia. Ta niedokładność wykonania może powodować zwiększenie oporów obrotu przegubu. Błędy kształtu mogą mieć oczywiście wpływ na zużywanie węzłów. Skojarzenia z wysokochromowej stali ($Cr > 18\%$) mają bardzo kiepskie właściwości tribologiczne (wyraźną skłonność do zacierania).

SYMULACYJNE BADANIA SZTYWNOŚCI STRUKTURY STABILIZATORA

Przeprowadzono także symulacyjne badania sztywności struktury stabilizatora modelując go przy pomocy MES.

Wpływ poszczególnych podzespołów współodpowiedzialnych za mechaniczną stabilizację pola operacyjnego (ramienia chwytaka A, uchwytu szczękowego ze śrubą B oraz ramienia statywu C, wg **Rys. 6a**) oceniono określając ich udział w całkowitym przemieszczeniu końca ramienia chwytaka. Przemieszczenie u_A , uwzględniające tylko podatność rurki ramienia chwytaka A pod wpływem F_x określono na podstawie modelu MES, w którym model szczęki ze śrubą zastąpiono sztywnym podparciem. Przemieszczenie u_{A+B} , uwzględniające łączną podatność rurki ramienia przysawki A oraz szczęki ze śrubą B pod wpływem F_x określono na podstawie pełnego modelu MES. Przemieszczenie u_{A+B+C} uwzględnia dodatkowo podatność ramienia statywu C określaną jak na **Rys. 6b**.



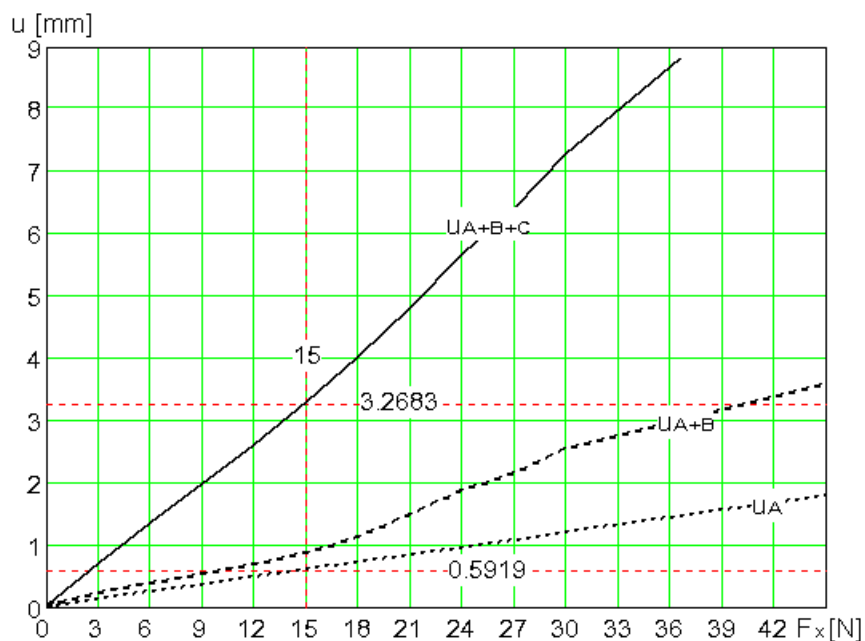
- a) Przesunięcie ramienia przyssawki jako skutek deformacji ramienia chwytaka A, szczęki ze śrubą B oraz ramienia statywu C przy obciążeniu ramienia chwytaka w kier. X,
 b) Przesunięcia ramienia przyssawki od deformacji ramienia statywu (obciążenie ramienia przyssawki w kier. X).

Rys. 6. Schemat odkształceń elementów stabilizatora

Fig. 6. Scheme of stabilizer elements deflections

Wyniki obliczeń wykazują, że przesunięcie ramienia przyssawki głównie powodowane jest przez odkształcenie ramienia statywu C. W wynikach obliczeń ramienia przyssawki A i szczęki ze śrubą B (u_{A+B}) można zaobserwować istotne nieliniowe zjawiska związane z tarciem, jednak ich skala jest znacznie mniejsza, a obszar występowania poza zakresem istotnym dla stabilizacji pola operacyjnego ($F_x > 15$ [N]). Założono bowiem, że maksymalne obciążenie działające na chwytak stabilizatora, pochodzące od pulsującego serca nie przekroczy 15 N. W obliczeniach przyjęto jednakowy współczynnik tarcia spoczynkowego i ruchowego $\mu = 0,2$. Zwiększony spadek sztywności, obserwowany na charakterystyce $u_{A+B} = u(F_x)$ w zakresie $F_x = 17 \div 30$ [N] (**Rys.7**) jest wynikiem wystąpienia poślizgu rurki ramienia przyssawki w szczęcie. Ewentualne zanieczyszczenie powierzchni rurki ramienia przyssawki może zmniejszyć obciążenie potrzebne do spowodowania poślizgu. Podobnie można przyspieszyć wystąpienie poślizgu w szczęcie poprzez zmniejszenie napięcia wstępnego śru-

by M6 do wartości poniżej $\sigma_r = 150$ [Mpa] (w rdzeniu gwintu). W zakresie $F_x = 30 \div 50$ [N] przemieszczanie końca ramienia przyssawki jest związane ze stałą sztywnością giętną rurki ramienia przyssawki, natomiast powyżej tego zakresu obciążenia następuje już istotna deformacja rurki w szczęce z zaciskiem śrubowym.



Rys. 7. Obliczone przemieszczenie ramienia chwytaka jako skutek odkształcenia ramienia chwytaka A, szczęki ze śrubą B oraz ramienia statywu C

Fig. 7. Calculated displacement of holder arm as a result of holder arm A deflection, clamp with screw B and stand arm C

Zarówno wyniki pomiarów jak też wyniki analizy numerycznej wykazują, że w obszarze roboczych obciążeń stabilizatora zapewniona jest wystarczająca sztywność jego struktury, ze współczynnikiem bezpieczeństwa powyżej 2. Maksymalne wartości przemieszczeń chwytaka wynoszą poniżej 1 mm.

PODSUMOWANIE

Skonstruowany i wdrożony do stosowania pierwszy w Polsce i w Europie stabilizator pola operacyjnego serca okazał się w pełni przydatny do przeprowadzania operacji kardiochirurgicznych na pracującym sercu. Struktu-

ra stabilizatora, zminimalizowana ze względu na dostęp do pola operacyjnego, okazała się wystarczająco sztywna, a przeguby cierne zapewniają wystarczająco duże opory tarcia. Gdański stabilizator, co najmniej równorzędny pod względem funkcjonalnym z urządzeniem firmy MEDTRONIC, jest od niego ok. trzydziestokrotnie tańszy w użyciu.

LITERATURA

1. Rogowski J., Maciakowski R., Romanowski P.: Urządzenie do unieruchamiania pola operacji chirurgicznej wykonywanej na pracującym sercu. Zgłoszenie patentowe P337855 z dnia 14.01.2000 r.
2. Rogowski J., Maciakowski R., Romanowski P.: Przyssawka urządzenia do unieruchamiania pola operacji chirurgicznej wykonywanej na pracującym sercu. Zgłoszenie patentowe W110491 z dnia 14.01.2000 r.
3. Siebert J., Rogowski J., Anisimowicz L., Kaczmarek M., Brzeziński M., Narkiewicz M.: Pomostowanie tętnic wieńcowych. Śródoperacyjna ocena przepływu w tętnicy piersiowej wewnętrznej metodą termografii. *Kardiol. Pol.* 1999; 50: 3222–328.
4. Rogowski J., Jarmoszewicz K., Jagielak D., Anisimowicz L., Siebert J., Narkiewicz M.: Mniej inwazyjne zabiegi przeszłowania aortalno-wieńcowego. *Wiadomości Lekarskie.* 1999; 52(9–10): 488–493.
5. Lango R., Rogowski J.: Znieczulenie i leczenie okołoperacyjne chorych poddanych mniej inwazyjnym zbiegom kardiolożchirurgicznym. *Anestezjologia Intensywna Terapia.* 2000, 32, 29–33.
6. Siebert J., Rogowski J., Jagielak D., Anisimowicz L., Lango R., Narkiewicz M.: Atrial Fibrillation after coronary artery bypass grafting without cardiopulmonary bypass. *European J. Cardiothorac. Surg.* 2000. 00. 1–4.

Recenzent:
Jan BURCAN

Summary

The first Polish and European stabilizer of surgical area on working heart was designed in Gdańsk University of Technology in cooperation with Medical Academy in Gdańsk. The stabilizer is necessary for operation without putting on extrasomatic circulation. American stabilizer (Medtronic Octopus Tissue Stabilization Unit) stabilizes opera-

tion area by pressing a heart what is not advantageous from medical point of view. Polish stabiliser is keeping a heart rising it up by means of suckers connected to vacuum pump what is much better. The cost of use of Polish stabilizer is about thirty times less than American. Stand research and numerical calculation proved sufficient stiffness of stabilizer structure and enough big friction moments in its joints. Stand testing of friction torque in stabilizer joints showed that friction torque depends significantly on accuracy of its shape. Calculated friction coefficient was the smallest and most repeatable in joints of the best shape accuracy. Clinical tests of the stabilizer confirmed its full usability for surgical operation on working heart.

Stanisław NOSA*L, Jan GRZEŚKOWIAK**

WYKORZYSTANIE WSPÓLCZYNNIKA TARCIA DO OCENY ODPORNOŚCI NA ZUŻYCIĘ ŻELIWNEGO SKOJARZENIA ŚLIZGOWEGO

USING THE COEFFICIENT OF FRICTION TO ASSESS THE EAR RESISTANCE OF CAST IRON SLIDING CONNECTIONS

Słowa kluczowe:

żeliwo, współczynnik tarcia, zużycie

Key words:

cast iron, coefficient of friction, wear

Streszczenie

W referacie przedstawiono metodę i wyniki badania odporności na zużycie żeliwa ZlCu1,4PVB, stosowanego na tuleje cylindrowe silników okrętowych. Próbkę żeliwa różniły się wielkością wydzieleni eutektyki fosforo-

* Politechnika Poznańska,

** H. Cegielski – CBR Sp. z o.o. Laboratorium Centralne Poznań.

wej i dodatkiem Ni. Próba zużycia prowadzona była tak, aby na całej drodze tarcia ($s = 5000$ m) współczynnik tarcia μ nie był większy niż przyjęta wartość $\mu_i < \mu_{kr}$. Wartości μ_i wynosiły: $\mu_1 = 0,115$, $\mu_2 = 0,160$, $\mu_3 = 0,220$, $\mu_{kr} = 0,310$. Jeśli w czasie próby zużycia zachodziło, że $\mu = \mu_i$, wówczas skojarzenie było impulsowo smarowane.

Stwierdzono, że metoda umożliwia porównanie odporności na zużycie żeliw nieznacznie różniących się składem chemicznym i strukturą.

WSTĘP

Żeliwo jest podstawowym materiałem stosowanym do produkcji tulei cylindrowych silników spalinowych, w tym również silników okrętowych napędu głównego. Można przypuszczać, że dzięki dobrym właściwościom technologicznym i tribologicznym tym materiałem jeszcze długo pozostanie. Autorzy tego artykułu przeprowadzili wiele badań dotyczących trwałości skojarzenia tuleja cylindrowa silnika okrętowego – pierścień tłokowy. Badania te dotyczyły głównie wpływu na właściwości tribologiczne (odporność na zacieranie i zużycie, przebieg i niezawodność docierania) takich m.in. czynników jak: dodatek boru do żeliwa ZICu1,4PV, wielkość i stopień uszkodzenia wydzieleń fazy twardej (eutektyki fosforowej z cementytem) i chropowatości technologicznej. Wyniki tych badań zostały opublikowane m.in. w pracach [L. 1–5].

Pewien problem badawczy dotyczył oceny odporności na zużycie żeliw stosowanych na tuleje cylindrowe, które niezznacznie różniły się strukturą lub składem chemicznym. W próbach prowadzonych w tradycyjny sposób (stałe obciążenie, prędkość i czas, tarcie suche lub ustalone warunki smarowania) nie występowały istotne różnice zużycia [L. 2, 3]. Dlatego opracowano własną metodę oceny odporności na zużycie.

Celem artykułu jest przedstawienie opracowanej metody oceny odporności na zużycie żeliwnych skojarzeń ślizgowych oraz wyników uzyskanych za jej pomocą.

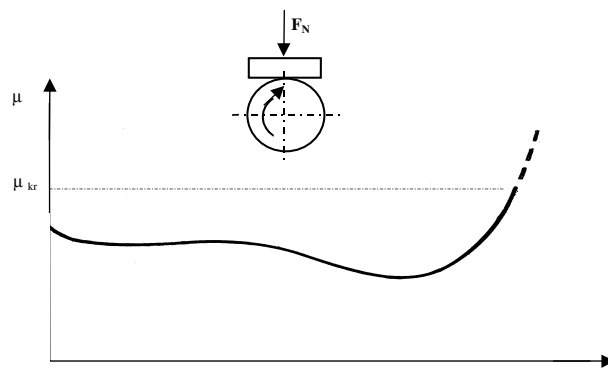
METODA

Po jednokrotnym nasmarowaniu żeliwnego skojarzenia ślizgowego lub smarowaniu go za pomocą poduszki nasączonej niewielką ilością oleju, wartość współczynnika tarcia po okresie docierania niezznacznie maleje i stabilizuje się na pewnym stałym poziomie – **Rys. 1**. Po okresie stabilizacji następuje widoczny spadek wartości współczynnika tarcia a następnie

jego wzrost aż do wartości krytycznej, której przekroczenie zapoczątkowuje nieodwracalne zmiany w warstwie wierzchniej trących się elementów. Impulsowe smarowanie skojarzenia po przekroczeniu krytycznej wartości współczynnika tarcia nie doprowadza już do stabilizacji współczynnika tarcia – **Rys. 2**. Następuje intensywne zużywanie trących się elementów skojarzenia, któremu towarzyszy znaczne uszkodzenie ich powierzchni. Jest to równoznaczne z zapoczątkowaniem zacierania.

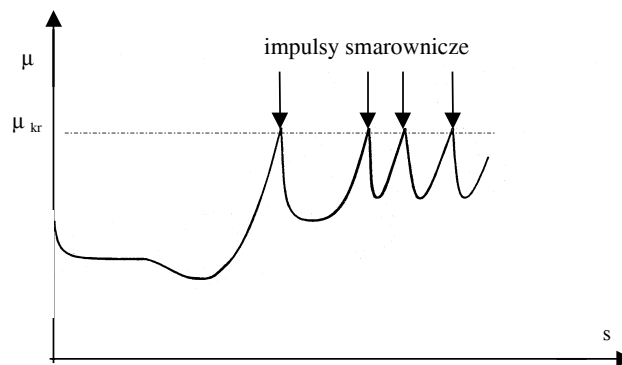
Doświadczalnie ustalono, że dla próbek wykonanych z żeliwa stosowanego na tuleje cylindrowe silników okrętowych współpracujących ślizgowo z przeciwpórkami z żeliwnego pierścienia tłokowego, krytyczna wartość współczynnika tarcia wynosi $\mu_{kr} = 0,310$.

Proponowana metoda oceny odporności na zużycie żeliw o niewielkich różnicach składu chemicznego i struktury polega na przyjęciu trzech wartości współczynnika tarcia $\mu_i < \mu_{kr}$.



Rys. 1. Przebieg współczynnika tarcia w funkcji drogi (słabe smarowanie)

Fig. 1. Coefficient of friction as a function of road (weak lubrication)

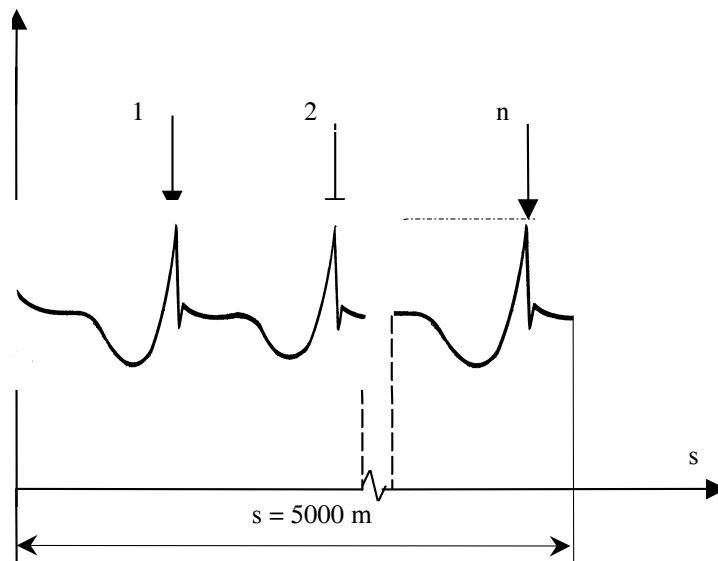


Rys. 2. Przebieg współczynnika tarcia po przekroczeniu wartości krytycznej

Fig. 2 Coefficient of friction after exceeding critical point

Próba zużycia prowadzona jest tak, żeby na całej drodze tarcia współczynnik tarcia $\mu \leq \mu_i$. Wówczas, gdy chwilowy współczynnik tarcia osiągnie wartość $\mu = \mu_i$ skojarzenie jest impulsowo smarowane, co schematycznie przedstawiono na **Rys. 3**.

Przyjęto następujące wartości współczynnika tarcia μ_i : $\mu_1 = 0,115$, $\mu_2 = 0,160$, $\mu_3 = 0,220$. Technicznie próbę zużycia prowadzono w następujący sposób. Najpierw skojarzenie docierano przy wzrastającym obciążeniu wynoszącym 200 N przez 5 minut i 500 N (5 minut). Następnie obciążenie zwiększono do 1000 N i próbę prowadzono tak długo, aby całkowita droga tarcia wyniosła $s = 5000$ m. W sposób ciągły rejestrowano moment tarcia i temperaturę przeciwpróbki. Jeśli moment tarcia osiągał przyjętą w danej próbie wartość μ_i , wtedy próbkę smarowano za pomocą poduszki filcowej nasyconej olejem parafinowym. Do każdej próby używano nowej poduszki nasyconej taką samą ilością oleju. Siła i czas docisku poduszki w czasie smarowania były jednakowe. Po zakończonej próbie określano zużycie wagowe próbki (krążka) i liniowe przeciwpróbki (szerokość śladu wytarcia) oraz liczbę impulsów smarowniczych na drodze tarcia $s = 5000$ m.



Rys. 3. Schematyczny przebieg próby zużycia; 1, 2,.. n – impulsy smarownicze

Fig. 3. Chart of wear test process; 1, 2,.. n – lubrication

WARUNKI I WYNIKI BADAŃ

Informacja o próbkach

Próbki oznaczone symbolami A, N, Z1, wykonano w postaci krążków o średnicy 49–56 mm i szerokości – 12 mm. Próbki A i N pobrane zostały z tulei cylindrowej silnika okrętowego z rodziny RTA odlanej z żeliwa Z1Cu1,4PVB. Próbki Z1 zostały wykonane z żeliwa szarego o symbolu Z1 200 i służyły do celów porównawczych.

Przeciwpróbkę wykonano z pierścienia tłokowego odlanego z żeliwa firmy Daros, stosowanego w tym samym silniku. Miała ona kształt płytki prostopadłościowej o wymiarach 16×10×5. Próbki A i N (**Tablica 1**) różniły się zawartością i wielkością wydzieleni fazy twardej, natomiast posiadały taką samą zawartość w niej steadytu. Próbka N zawierała dodatek niklu wynoszący 0,178%. Próbki Z1 różniły się znacząco od pozostałych składem chemicznym, wielkością wydzieleni fazy twardej i zawartością w niej steadytu.

Tablica 1. Charakterystyka żeliw stosowanych na próbki (krążki) i przeciwpróbki (płytki)

Tab. 1. Characteristics of cast irons used as samples (disks) and counter-samples (plates)

L. p.	Materiał	Element pary trącej	Symbol próbek	Rodzaj odlewu	Klasa wydzieleni FT	Zawartość FT [%]	Udział F2 w FT [%]	Uwagi
1	Z1Cu1,4PVB	Próbka	A	p	6	5	30	
2	Z1Cu1,4PVB	Próbka	N	k	4–5	7,1	30	dodatek Ni
3	Z1 200	Próbka	Z1	p	1–2	2	100	
1	Żeliwo Daros	Przeciwpróbka	K	k	bardzo drobne	2	50	

FT – faza twarda, F2 – eutektyka fosforowa, p – odlew piaskowy, k – odlew kokilowy

Oprócz badań metalograficznych próbek i przeciwpróbek zmierzono także ich twardość metodą Brinella wg PN-91/H-04350 i mikrotwardość metodą Vickersa. Wyniki tych pomiarów zamieszczono w **Tablicach 2 i 3**.

Tablica 2. Twardość HB-10/3000/15 próbek i przeciwpróbki

Tab. 2. Hardness of samples and counter-samples

Oznacz. próbki	A	N	ZI	K
Twardość HB	210	229	205	201

Tablica 3. Mikrotwardość HV0,2 fazy twardej w próbkach

Tab. 3. Microhardness of hardness phase in samples

Oznaczenie próbki	Składnik fazy twardej	
	Cementyt	Steadyt
A	1087	
N	1193	
ZI	brak	666

Pomiar mikrotwardości steadytu w próbkach A i N nie został wykonany ze względu na zbyt małe wydzielenia tej fazy.

WARUNKI I WYNIKI BADAŃ

Warunki te zostały już w dużym stopniu omówione w poprzednim punkcie artykułu. Tytułem uzupełnienia należy dodać, że badania prowadzono na maszynie tarciowej typu Amsler. Prędkość ślizgania wynosiła $V = 0,56$ m/s. Próbki i przeciwpróbki miały chropowatość ok. $R_a = 0,50$ μm .

Uzyskane wyniki przedstawiono w **Tablicach 4–6**. Podano w nich wartości średnie wraz z odchyleniem standardowym.

Tablica 4. Zużycie wagowe Z_w próbek żeliwnych (A, N, ZI) w zależności od przyjętych wartości współczynnika tarcia μ Tab. 4. Weight wear Z_w for different cast irons (A, N, ZI) and values of coefficient of friction μ

Wartość μ	$Z_w \cdot 10^{-4}$ [g]		
	A	N	ZI
$\mu \leq \mu_1 = 0,115$	$9,2 \pm 4,5$	$27,8 \pm 13,1$	$376,9 \pm 374,0$
$\mu \leq \mu_2 = 0,160$	$51,0 \pm 14,0$	$253,4 \pm 101,1$	–
$\mu \leq \mu_3 = 0,220$	$92,3 \pm 25,3$	$362,4 \pm 238,9$	–

Tablica 5. Szerokość śladu zużycia Z_1 na przeciwpróbce w zależności od rodzaju żeliwa (A, N, ZI) i przyjętych wartości współczynnika tarcia μ

Tab. 5. Linear wear Z_1 of counter-sample according to type of cast iron (A, N, ZI) and coefficient of friction μ

Wartość μ	Z_1 [mm]		
	A	N	ZI
$\mu \leq \mu_1 = 0,115$	$2,46 \pm 0,49$	$2,27 \pm 0,41$	$2,32 \pm 0,77$
$\mu \leq \mu_2 = 0,160$	$3,00 \pm 0,59$	$3,64 \pm 0,44$	–
$\mu \leq \mu_3 = 0,220$	$3,50 \pm 0,43$	$3,83 \pm 0,63$	–

Tablica 6. Liczba impulsów smarowniczych w zależności od rodzaju żeliwa (A, N, ZI) i przyjętych wartości współczynnika tarcia μ

Tab. 6. Number of lubrication impulses according to type of cast iron (A, N, ZI) and coefficient of friction μ

Wartość μ	A	N	ZI
$\mu \leq \mu_1 = 0,115$	34 ± 19	55 ± 24	34 ± 19
$\mu \leq \mu_2 = 0,160$	38 ± 21	43 ± 8	–
$\mu \leq \mu_3 = 0,220$	42 ± 18	45 ± 11	–

Dane zamieszczone w **Tablicach 4–6** dotyczą tylko tych skojarzeń, które przetrwały drogę tarcia wynoszącą 5000 m. Duże wartości odchylenia standardowego zużycia próbek N dla $\mu \leq \mu_2 = 0,160$ i $\mu \leq \mu_3 = 0,220$ oraz próbek ZI dla $\mu \leq \mu_1 = 0,115$ (**Tablica 4**) zostały spowodowane pojawieniem się na powierzchni niektórych próbek pojedynczych **Rys**. W przypadku ich wystąpienia odnotowywano znacznie większe wartości zużycia, nie traktowano jednak tego zjawiska jako początku zacierania. Brak wyników pomiaru zużycia próbek ZI dla $\mu \leq \mu_2 = 0,160$ i $\mu \leq \mu_3 = 0,220$ został spowodowany tym, że wszystkie skojarzenia się zatarły w czasie trwania próby.

Bardzo duży rozrzut liczby impulsów smarowniczych (**Tablica 6**) nie pozwala na ustalenie związku między odpornością na zużycie a zapotrzebowaniem na smarowanie.

Metoda pozwoliła wykazać istotne różnice odporności na zużycie badanych żeliw, w przybliżeniu jak 1:3:40 (dla $\mu \leq \mu_1 = 0,115$). Jest to szczególnie ważne w przypadku żeliw A i N, które niewiele różnią się składem chemicznym i strukturą.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych i wyżej opisanych badań można stwierdzić, że:

1. Zaproponowana metoda prowadzenia prób zużycia oparta na ciągłym pomiarze współczynnika tarcia i smarowaniu w chwili, gdy osiąga on założoną wartość, umożliwia określenie odporności na zużycia żeliw nieznacznie różniących się składem chemicznym i strukturą; (próbki N zawierały dodatek 0,18% Ni i trochę więcej eutektyki fosforowej z cementytem niż próbki A).
2. Dodatek niklu do żeliwa ZlCu1,4PVB, wbrew informacjom zawartym w literaturze np. [6], nie zwiększył jego odporności na zużycie.

LITERATURA

1. Nosal S., Grześkowiak J.: Badania porównawcze żeliw ZlCu1,4PV i ZlCu1,4PVB stosowanych na tuleje cylindrowe silników okrętowych, Silniki Spalinowe, 1990, nr 3–4, s. 1–5.
2. Grześkowiak J., Kotkowski K., Wołyńska-Mrowicka E., Nosal S.: Wpływ zmian konstrukcyjnych na właściwości żeliwnych tulei cylindrowych silników okrętowych napędu głównego, Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, 1999, vol. 19, nr 2, s. 221–231.
3. Grześkowiak J., Nosal S.: Wpływ eutektyki fosforowej na właściwości tribologiczne żeliw, w: XXIII Jesienna Szkoła Tribologiczna, Zielona Góra – Lubiatów, 21–24.09.1999, s. 63–67.
4. Nosal S., Grześkowiak J., Kotkowski K., Wołyńska-Mrowicka E., Heppel K.: Wpływ wybranych czynników na przebieg docierania węzła modelującego skojarzenie tuleja cylindrowa – pierścień tłokowy silnika okrętowego, w: IX Kongres Eksploatacji Urządzeń Technicznych, Krynica, 25–28.09.2001, t. 2, s. 143–152.
5. Nosal S., Grześkowiak J.: Wpływ wybranych czynników na przebieg docierania żeliwnych skojarzeń ślizgowych, Tribologia, 2002, nr 2, s. 505–513.
6. Astaškevič B.M., Pročnost' i iznosostojkost' čuguna dlja vtulok cilindrov dizelej, Metalloved. i term. obrab. met., 1987, nr 7.

Recenzent:

Marian SZCZEREK

Summary

This paper presents method and results of the research on wear resistance of cast iron Z1Cu1,4PVB used in the marine engine cylinder liner. Cast iron samples had different grain size of phosphide eutectic and accompaniment Ni. Coefficient of friction μ had to be lower than assumed value ($\mu_i < \mu_{kr}$) during the whole road of friction ($s = 5000$ m). μ_i values amounted to: $\mu_1 = 0,115$; $\mu_2 = 0,160$; $\mu_3 = 0,220$. If during the wear test there occurred that $\mu = \mu_p$, the sliding connection was pulse-lubricated.

It was stated that the method enables comparison of wear resistance of cast irons with slight differences in chemical composition and structure.

Edyta OSUCH-SŁOMKA*, Marian GRZYDKOWSKI*

**WPLYW ZAWARTOŚCI NAPEŁNIACZA
NA WŁAŚCIWOŚCI TARCIOWE KOMPOZYTÓW
POLITETRAFLUOROETYLENU**

**INFLUENCE OF FILLERS ON FRICTIONAL PROPERTIES
OF POLYTETRAFLUOROETHYLENE (PTFE) COMPOSITES**

Słowa kluczowe:

Politetrafluoroetylen, kompozyty polimerowe, tarcie technicznie suche, współczynnik tarcia, zużycie

Key-words

Polytetrafluoroethylene, composites, dry friction, friction coefficient, wear

Streszczenie

W pracy zbadano wpływ zawartości grafitu, dwusiarczku molibdenu i brązu na właściwości ślizgowe kompozycji PTFE w skojarzeniu tarciovym ze stalą narzędziową NC10. Stwierdzono, że poszczególne napełniacze w złożony, trudny do przewidzenia sposób, wpływają na właściwości tar-

* Instytut Technologii Eksploatacji w radomiu, ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, tel. (048) 36-442-41.

ciowe kompozytów PTFE: np. zmniejszeniu oporów ruchu może towarzyszyć zwiększone zużycie lub przy różnych oporach ruchu występuje zbliżone zużycie. Tak więc zużycie kompozytów PTFE w układzie tarciovym ze stalą zależy nie tylko od oporów ruchu. Dlatego też należy bardzo ostrożnie podejmować decyzje w sprawie wyboru napełniacza funkcjonalnego dla kompozytów PTFE współpracujących ze stalą, a decyzje każdorazowo weryfikować eksperymentalnie.

WPROWADZENIE

W budowie uszczelnień i łożysk ślizgowych powszechnie jest stosowany politetrafluoroetylen (PTFE) i kompozyty wytwarzane na jego bazie. Fazę zdyspergowaną w tych kompozytach stanowią smary stałe [L. 1, 2] takie jak grafit i dwusiarczek molibdenu (MoS_2) oraz materiały dobrze przewodzące ciepło, np. brąz. Badania [L. 3] wykazały, że zużycie kompozytów PTFE napełnionych brązem, grafitem lub MoS_2 w skojarzeniu tribologicznym ze stalą, nie jest zależne od oporów ruchu. Szczegółowe badania [L. 4] oporów ruchu i zużycia kompozytów zawierających wieloskładnikowe kompozycje napełniaczy w PTFE nie wykazało zależności pomiędzy cechami materiałowymi kompozytu a jego właściwościami tarciovymi w suchym kontakcie ze stalą.

Celem pracy było zbadanie wpływu zawartości grafitu, MoS_2 , i brązu na właściwości ślizgowe binarnych i wieloskładnikowych kompozycji wytworzonych na bazie Tarflenu w skojarzeniu tribologicznym ze stalą narzędziową NC10.

METODYKA BADAŃ

Testy tribologiczne prowadzono w węźle tarcia o strukturze pierścień-tarcza (stal/kompozyt PTFE), przy liniowej prędkości ślizgania $v = 0,2$ m/s, nacisku jednostkowym $p_j = 0,23$ N/mm², w warunkach tarcia technicznie suchego w czasie 1800 s, co odpowiadało drodze 360 m. Wilgotność powietrza podczas testów wynosiła 50–60%, a temperatura otoczenia 23 ± 3 °C. Próbkę kompozytów przygotowano zgodnie z metodyką przedstawioną w [L. 3, 5] stosując PTFE, wytwarzany metodą suspensyjną w Zakładach Azotowych Tarnów-Mościce S.A. pod nazwą Tarflenä (proszek M1 o rozmiarach cząstek 50–100 µm). W roli napełniaczy funkcjonalnych używano brązu B10 o rozmiarze ziaren 30–40 µm wytwarzany w Zakładach Me-

talurgicznych w Trzebini, grafit syntetyczny o ziarnach 40–50 mm (Zakłady Elektrod Węglowych w Raciborzu) oraz syntetyczny MoS_2 o symbolu BDH 29268.4 L01 i uziarnieniu ~ 10 mm produkcji Merck KGaA. Składy ilościowe próbek do badań ustalono na podstawie obliczeń optymalizacyjnych dla odporności na zużywanie za pomocą testu ortogonalnego PS/DS-P [L. 6, 7] przy założonym modelu matematycznym nieliniowej funkcji regresji w postaci wielomianu drugiego stopnia i zakresie zmienności czynników niezależnych: zawartość brązu – 1–40%, grafitu – 1–20%, MoS_2 – 0,5–4,0%.

WYNIKI BADAŃ

Skład próbek kompozytowych stosowanych w badaniach oraz średnią chropowatość ich powierzchni przedstawiono w **Tabeli 1**. Jak wynika z danych tej tabeli, bezwzględne wielkości charakteryzujące chropowatości powierzchni wszystkich kompozytów przyjmują stosunkowo niskie wartości. Jednak pomimo identycznych warunków szlifowania i polerowania wszystkich próbek, względne różnice chropowatości poszczególnych kompozytów przekraczały wielkość 2. Również w przypadku kompozytów zawierających smar stały (grafit lub MoS_2) brak jest korelacji pomiędzy jego zawartością w PTFE a chropowatością. Jedynie w przypadku kompozytu zawierającego najtwardszy ze stosowanych napelniaczy – brąz – obserwuje się wzrost chropowatości powierzchni w miarę zwiększania udziału napelniacza w PTFE. W przypadku kompozytu wieloskładnikowego występują następujące zależności: kompozyty zawierające najmniejsze ilości napelniaczy (4,5% brązu, 2,7% grafitu, 0,8% MoS_2) wykazują najniższą chropowatość powierzchni; chropowatość kompozytów zawierających brąz rośnie wraz z jego ilością w PTFE niezależnie od udziału innych napelniaczy.

Na **Rys. 1a–d** przedstawiono charakterystyczne (zaobserwowane) zależności oporów ruchu od drogi tarcia binarnych i wieloskładnikowych materiałów kompozytowych PTFE współpracujących ze stalą. Zmiana oporów ruchu w funkcji drogi odzwierciedla zmiany warunków tarcia, które zależą głównie od interakcji zachodzących w styku stal-polimer, komplikowanych dodatkowo obecnością napelniacza w strefie tarcia. Dane przedstawione na tych rysunkach wykazują, że poszczególne napelniacze różnie kształtują opory ruchu w systemie tribologicznym stal/kompozyt PTFE.

Zmiany wartości siły tarcia w funkcji drogi dla układu stal/PTFE (czyści) zaprezentowane na **Rys. 1a** można interpretować następująco:

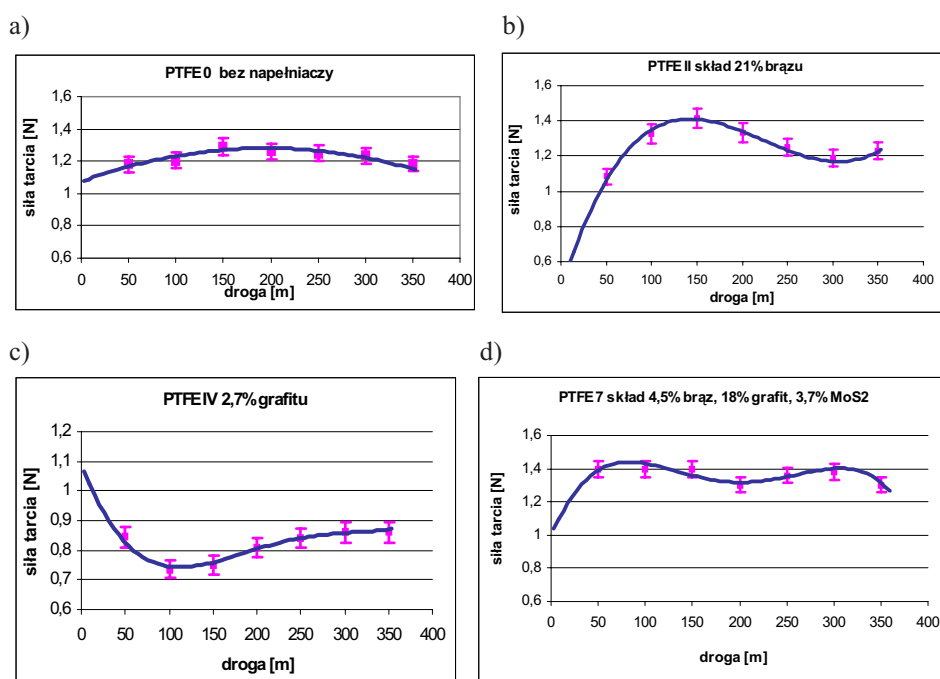
Tabela 1. Skład binarnych i wieloskładnikowych kompozytów PTFE oraz średnia chropowatość próbek używanych w badaniach właściwości tribologicznych

Symbol próbki	Skład kompozytu PTFE, udział masowy [%]				Chropowatość, [μm] R_a
	PTFE	Brąz	Grafit	MoS ₂	
PTFE 0	100	–	–	–	0,218
PTFE I	95,5	4,5	–	–	0,090
PTFE II	79,0	21,0	–	–	0,167
PTFE III	63,5	36,5	–	–	0,267
PTFE IV	97,3	–	2,7	–	0,117
PTFE V	89,5	–	10,5	–	0,223
PTFE VI	82,0	–	18,0	–	0,115
PTFE VII	99,5	–	–	0,5	0,060
PTFE VIII	97,8	–	–	2,2	0,180
PTFE IX	96,0	–	–	4,0	0,073
PTFE 1	92	4,5	2,7	0,8	0,177
PTFE 2	60	36,5	2,7	0,8	0,437
PTFE 3	76,7	4,5	18,0	0,8	0,247
PTFE 4	44,7	36,5	18,0	0,8	0,237
PTFE 5	89,1	4,5	2,7	3,7	0,223
PTFE 6	57,1	36,5	2,7	3,7	0,293
PTFE 7	73,8	4,5	18,0	3,7	0,293
PTFE 8	41,8	36,5	18,0	3,7	0,347
PTFE 9	66,3	21,0	10,5	2,2	0,273
PTFE 10	47,3	40,0	10,5	2,2	0,323
PTFE 11	75,8	21,0	1,0	2,2	0,230
PTFE 12	68,0	21,0	10,5	0,5	0,277
PTFE 13	64,5	21,0	10,5	4,0	0,247

- początkowy wzrost oporów ruchu jest prawdopodobnie związany z „dopasowywaniem się – wygładzaniem” powierzchni kompozytu co prowadzi do przyrostu pola powierzchni kontaktu i związanego z tym, wzrostu siły oddziaływań międzyfazowych, a także rozwoju liczby szczepień adhezyjnych. Polimer jest stopniowo przenoszony na powierzchnię stali (adhezyjne niszczenie powierzchniowych warstw próbki PTFE i ich ciągłe odnawianie, a powierzchnia stali stopniowo pokrywa się warstwą polimery). W trakcie tarcia zachodzi przenoszenie i namazywanie PTFE na powierzchnię stali;

- po około 200 m ustala się stan równowagi w węzle tarcia. Materiał polimerowy jest „płynnie” wymieniany pomiędzy współpracującymi powierzchniami polimer–polimer/stal. Przekształcenie warstw wierzchnich obu powierzchni w wyniku „samoorganizacji” systemu tribologicznego prowadzi do powolnego spadku oporów ruchu.

Ogólnie rzecz ujmując, analiza danych przedstawionych na **Rys. 1 a), b), c), d)** pozwala stwierdzić, że rodzaj napełniacza PTFE wpływa na wielkość oporów ruchu w kontakcie tarciovym stal/kompozyt PTFE oraz na

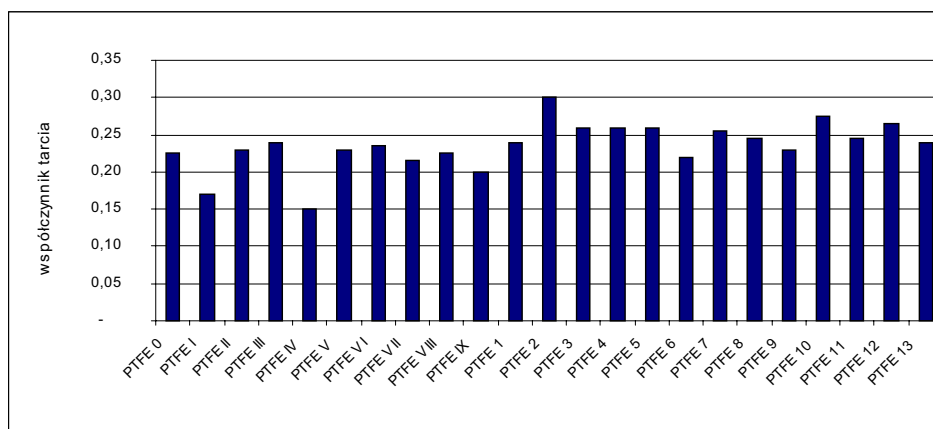


Rys. 1. Zależność siły tarcia od drogi w układzie tarciovym stal/PTFE: a) PTFE 0 baza, b) PTFE II – 21% brązu, c) PTFE IV – 2,7% grafitu, d) PTFE 7 – 4,5% brązu, 18% grafitu, 3,7% MoS₂

Fig. 1. Dependence of frictional force in the contact with steel/PTFE: a) PTFE 0, b) PTFE II with 21% bronze, c) PTFE IV with 2,7% graphite, d) PTFE 7 with 4,5% bronze, 18% graphite, 3,7% MoS₂

charakter ich zmian w funkcji drogi tarcia. W niektórych przypadkach następuje wzrost oporów ruchu w miarę przyrostu drogi tarcia, w innych spadek. Znaczne zmiany oporów ruchu w funkcji drogi tarcia układów stal/PTFE z różnymi napełniaczami utrudniają wyznaczenie i porównanie

chwilowych (brak kryteriów wyboru) wartości współczynników tarcia dla poszczególnych układów materiałowych. Dlatego też dla porównania właściwości tarciovych poszczególnych kompozytów wyznaczano średnie wartości współczynników tarcia dla drogi 360 m (**Rys. 2**) i masowe zużycie próbki kompozytu PTFE po tarcu na drodze 360 m (**Tab. 2**).



Rys. 2. Średnie wartości współczynnika tarcia dla układów tarciovych stal/kompozyt PTFE

Fig. 2. Average of friction coefficient of configuration: steel/PTFE composites

Współczynniki tarcia w „suchym” kontakcie ze stalą dla większości badanych kompozytów binarnych mieszczą się w zakresie $0,2 \div 0,24$. Jedynie w dwóch przypadkach były one wyraźnie niższe, zbliżone do wartości współczynników tarcia [L. 8]. Dotyczyło to kompozytów zawierających 2,7% grafitu (PTFE IV) oraz 4,5% brązu (PTFE I), a więc napelniaczy spełniających odmienne funkcje w kompozycie. Ogólnie dla kompozytów binarnych można stwierdzić następujące tendencje: im większa zawartość brązu w PTFE, tym współczynnik tarcia w kontakcie ze stalą większy (PTFE I, III), ze wzrostem udziału grafitu rośnie współczynnik tarcia (PTFE IV÷VI), zmianie zawartości MoS_2 w PTFE nie towarzyszy adekwatna zmiana współczynnika tarcia (PTFE VII÷IX).

Wieloskładnikowe kompozyty PTFE wykazywały z reguły wyższe współczynniki tarcia w kontakcie ze stalą niż kompozyty binarne - podobne spostrzeżenia występują w pracy [L. 8] uzyskane współczynniki tarcia dla binarnych kompozytów wynosiły 0,12, 0,15, 0,17, a dla złożonych kom-

pozytów 0,24, 0,25, 0,3 – ich wartość oscylowała w pobliżu 0,25 lub nieco powyżej. Stosunkowo najniższe współczynniki tarcia wykazywały próbki PTFE 1, PTFE 6, PTFE 9 ($0,20 \div 0,23$). W tej grupie znajdują się kompozyty o niskiej (PTFE 1) jak i wysokiej (PTFE 6) łącznej zawartości napełniacza. Najwyższym współczynnikiem tarcia ($\mu = 0,3$) charakteryzował się kompozyt PTFE 2. Może to być skutkiem dużej zawartości w nim brązu przy stosunkowo niskich zawartościach smarów stałych (grafitu i MoS_2). Na taką zależność właściwości smarnych od składu kompozytu wskazują właściwości tribologiczne kompozytu PTFE 10 (40,0% brązu, 10,5% grafitu, 2,2% MoS_2). Wyraźne zwiększenie udziału smarów stałych w tym kompozycie w stosunku do kompozytu PTFE 2 spowodowało obniżenie współczynnika tarcia do wartości 0,28. Dalszy wzrost udziału smarów stałych (kompozyt PTFE 4) do 18,8% zapewniło dalsze obniżenie współczynnika tarcia do wartości 0,26.

Tabela 2. Zużycie masowe próbek materiałów kompozytowych wytwarzanych na bazie PTFE

Symbol próbki	Wielkość zużycia, [mg]	Symbol próbki	Wielkość zużycia, [mg]
PTFE 0	9,0	PTFE 1	0,4
PTFE I	0,75	PTFE 2	0,3
PTFE II	0,25	PTFE 3	0,25
PTFE III	0,1	PTFE 4	0,15
PTFE IV	0,35	PTFE 5	0,1
PTFE V	0,25	PTFE 6	0,2
PTFE VI	0,1	PTFE 7	0,0
PTFE VII	16	PTFE 8	0,45
PTFE VIII	16	PTFE 9	0,0
PTFE IX	45	PTFE 10	0,1
		PTFE 11	0,15
		PTFE 12	0,2
		PTFE 13	0,0

Pomimo wyższych współczynników tarcia, zużycie kompozytów wieloskładnikowych było niższe niż jednoskładnikowych, o niższych współczynnikach tarcia. Szczególnie duże zużycie kompozytu, wzrastające wraz ze wzrostem zawartości napełniacza, stwierdzono dla kompozytów binar-

nych zawierających MoS_2 (PTFE VII, VIII i IX). Było ono o dwa rzędy wielkości wyższe niż dla próbek zawierających inne badane napełniacze. Zjawisko to jest trudne do wyjaśnienia zużyciem ściernym lub adhezyjnym. Jedną z przyczyn mogą być niekontrolowane procesy chemiczne, związane z właściwościami używanego MoS_2 . Istotną rolę w tym procesie mogły odegrać pewne ilości fluoru (silny utleniacz) uwalniane we wczesnych fazach destrukcji PTFE w wyniku tarcia. Wyjaśnienie tego problemu wymaga odrębnych badań. W przypadku pozostałych badanych napełniaczy wzrost ich udziału w PTFE powodował obniżenie zużycia. Można stwierdzić, że wielkość zużycia masowego wyraźniej niż opory ruchu różnicuje właściwości tarciove kompozytów PTFE, zawierających zmienne ilości poszczególnych napełniaczy, w kontakcie ze stalą. Zużycie masowe czteroskładnikowych kompozytów PTFE w kontakcie tarciovym ze stalą było na ogół niższe niż kompozytów dwuskładnikowych. W części przypadku nie przekraczało ono błędu pomiaru masy.

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania potwierdziły, że zużycie kompozytów PTFE w układzie tarciovym ze stalą nie jest bezpośrednią pochodną oporów ruchu. Na przykład: próbki PTFE II i PTFE IV zawierały różne napełniacze – brąz i grafit, które spełniają w układzie tarciovym różne funkcje. W efekcie opory ruchu w funkcji drogi tarcia (**Rys. 1**) oraz współczynniki tarcia skojarzenia zawierającego te materiały (**Rys. 2**) znacznie różniły się. Pomimo tego zużycie masowe obydwu próbek było zbliżone (**Tab. 2**). Szczegółowe badanie wartości współczynników tarcia i zużycia kompozytów zawierających zmienne ilości różnych napełniaczy w Tarflenie także nie wykazały jednoznacznych zależności pomiędzy składem kompozytu a jego właściwościami tribologicznymi. Przy doborze składu kompozytów PTFE, współpracujących tarciovym ze stalą, należy więc bardzo ostrożnie podejmować decyzje w sprawie wyboru napełniaczy funkcjonalnych, a założenia każdorazowo weryfikować eksperymentalnie.

LITERATURA

1. Tevrúz T.: Tribological behaviours of carbon filled polytetrafluoroethylene (PTFE) dry journal bearings. *Wear* 221 (1998) 61–68.
2. Tevrúz T.: Tribological behaviours of bronze – filled polytetrafluoroethylene dry journal bearing. *Wear* 230 (1999) 61–69.

3. Osuch-Słomka E., Grądkowski M.: Zależność właściwości tarcowych kompozytów politetrafluoroetyleny od zawartości napełniacza. *Problemy Eksploatacji*, 2002, 4, 151–159.
4. Osuch-Słomka E., Grądkowski M.: Zależność właściwości tarcowych od zawartości napełniaczy czteroskładnikowych kompozytów tarflenowych, *Problemy Eksploatacji* 2003, 1.
5. Opracowanie metody prognozowania właściwości tribologicznych kompozytów polimerowych stosowanych na uszczelnienia czołowe na podstawie pomiarów energii powierzchniowej. Sprawozdanie z projektu badawczego 7T08C 055 19, red. M. Grądkowski, ITeE, Radom 2002.
6. Mańczak K.: *Technika planowania eksperymentu*. WNT, Warszawa 1976.
7. Doerffel K.: *Statystyka dla chemików analityków*. WNT, Warszawa 1989.
8. Wieleba W., Ziemiański K.: Tribologiczne aspekty wykorzystania wieloskładnikowych kompozytów polimerowych na osnowie PTFE. VII Seminarium Tworzywa Sztuczne w Budowie Maszyn. Kraków 1994r, s. 417–422.

Recenzent:
Janusz JANECKI

Summary

In this work was finding an effect of the content of graphite, disulphide of molybdenum (MoS_2) and bronze on sliding properties of PTFE composites in the contact with a tool steel. It was observed that an influence of fillers on the sliding properties of PTFE composites is hard to assess. For example, a decrease in friction with increasing wear was shown. For different friction coefficient values similar wear (mass loss) was noted. So, wear of PTFE composites rubbing against steel is independent of friction. It has been concluded that selection of fillers for PTFE composites which are to rub against steel must be performed very carefully. In every case experimental way is necessary.

Zbigniew PAWELEC*, Janusz DASIEWICZ*

ANALIZA PRZYDATNOŚCI PROSZKÓW METALI I STOPÓW JAKO NAPEŁNIACZY ŚLIZGOWYCH KOMPOZYTÓW POLIMEROWYCH

ASSESSMENT OF SUITABILITY OF POWDERED METALS AND ALLOYS AS FILLERS IN POLYMER COMPOSITES FOR SLIDING TRIBOSYSTEMS

Słowa kluczowe:

Kompozyt polimerowy, napełniacze, energia powierzchniowa, tarcie, zużycie.

Keywords

Polymer composite, fillers, surface energy, friction, wear

Streszczenie

W artykule przedstawiono wpływ proszkowych napełniaczy metalicznych na właściwości fizykomechaniczne cieplne i tribologiczne kompozytów polimerowych. Za pomocą mikroskopu określono skład chemiczny i para-

* Instytut Technologii Eksploatacji w radomiu, ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, tel. (048) 36-442-41.

metry stereometryczne komponentów proszkowych. Jako napelniacze metaliczne zastosowano proszki żelaza jego stopów i innych metali oraz mieszaniny tych komponentów. Dokonano oceny właściwości fizykomechanicznych i cieplnych, opracowanych kompozytów, a ich parametry tribologiczne określono na maszynie tarciowej T-05 typu rolka-kłosek. Wykorzystując skaningowy mikroskop elektronowy przeprowadzono analizę stanu powierzchni próbek kompozytów po eksperymencie tribologicznym i określono stężenie występowania na powierzchni wytypowanych pierwiastków.

WPROWADZENIE

Tworzywa kompozytowe otworzyły nowe możliwości i perspektywy przed inżynierią materiałową zwłaszcza co do zakresu stosowalności polimerów organicznych. Wykorzystanie matryc polimerowych do wytwarzania kompozytów stanowi ważniejszy etap rozwoju nowych materiałów niż zastosowanie matryc metalowych oraz ceramicznych w metalurgii i do wytwarzania ceramiki. Szczególnie cenna stała się możliwość wykorzystania dużej różnorodności matryc polimerowych (termoplasty, żywice chemo- i termoutwardzalne, polimery naturalne, kopolimery, kauczuki), jak i postaci materiałów stanowiących fazę rozproszoną (włókna węglowe, szklane, aramidowe, włókna naturalne mineralne i biopolimerowe). Istotny wpływ na właściwości mechaniczne, elektryczne, antykorozyjne lub cieplne wytwarzanych kompozytów ma także sposób przestrzennego rozmieszczenia napelniaczy w matrycy polimerowej (układ jednoosiowy, gradientowy, warstwowy, chaotyczny). Dzięki temu we względnie prosty sposób można uzyskać całkowicie nowe lub też w istotny sposób poprawić dotychczasowe właściwości [L. 1, 2, 3].

Materiały kompozytowe na podstawie polimerowej coraz powszechniej zastępują metale i ich stopy w zastosowaniach do części maszyn pracujących w warunkach tarcia. Są one chyba jedyną grupą materiałów, które stosuje się zarówno w węzłach, gdzie wymagane jest jak najmniejsze tarcie (łożyska ślizgowe), jak i tam, gdzie zachodzi potrzeba dużych oporów ruchu (okładziny hamulcowe). Obok całego szeregu zalet kompozytów polimerowych, które decydują o ich stosowaniu jako materiały ślizgowe mają one pewne ograniczenia: małą przewodność i odporność cieplną i stosunkowo dużą rozszerzalność [L. 4, 5].

Najważniejsze parametry decydujące o przydatności materiałów konstrukcyjnych zapisano w **Tabeli 1**.

Tabela 1. Pożądane tendencje kształtowania podstawowych właściwości materiałów konstrukcyjnych decydujących o ich użyteczności

↑	Wytrzymałość	↑	Temperatura pracy
↑	Sztywność	↑	Ciągliwość
↓	Gęstość	↓	Koszt

W procesie projektowania – komponowania materiałów kompozytowych, wyraźnie zaznacza się oczekiwanie małej gęstości, a możliwie dużej wytrzymałości właściwej R_m/γ (wytrzymałość odniesiona do gęstości) oraz dużej sztywności właściwej E/γ (moduł Younga odniesiony do gęstości). Kompozyty polimerowe pozwalają na uzyskanie wyjątkowo dużych wartości R_m/γ i lub E/γ jest to jeden z powodów ich stosowania. w różnych konstrukcjach [L. 6, 7, 8].

WYNIKI BADAŃ

Poddane badaniom kompozyty metalożywiczne stanowią przykład kompozytów proszkowych. Model wytrzymałościowy takiego materiału zasadniczo odbiega od modelu kompozytu włóknistego. Kompozyt taki jest bliższy cechom materiału izotropowego, stopień jego niejednorodności jest znacznie niższy niż kompozytu zbrojonego włóknem a stosowane napełniacze proszkowe muszą spełniać następujące warunki:

- być chemicznie obojętnym w stosunku do osnowy i nie wpływać na przebieg procesu sieciowania,
- charakteryzować się wysoką dyspersją,
- być dobrze zwilżalnym przez osnowę.

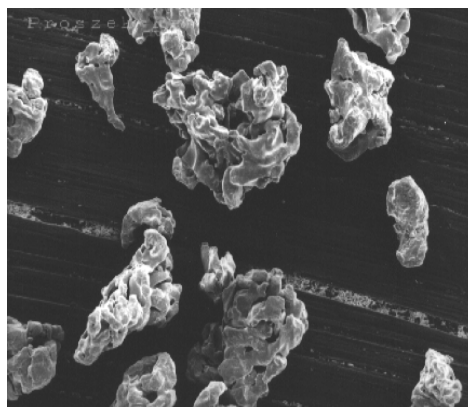
Wymagania takie spełniają m.in. napełniacze proszkowe pochodzenia mineralnego oraz sproszkowane metale i ich tlenki.

Celem badań było określenie wpływu rodzaju, granulacji szczególnie frakcji poniżej 40 μm i składu chemicznego podstawowego napełniacza proszkowego na właściwości użytkowe otrzymanych kompozytów polimerowych. Jako napełniacze kompozytów zastosowano:

- proszek żelaza Fe,
- proszek stopowy Sn – Cu,
- proszek stopowy NiCrFe,

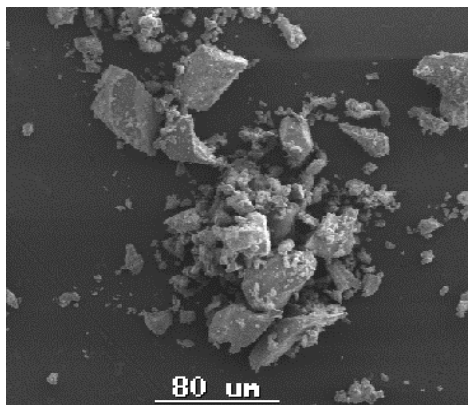
- proszek stopowy Fe – Mn,
- proszek żelaza MT-212.

Dla określenia parametrów stereometrycznych wybranych napełniaczy poddano ich obserwacji na skaningowym mikroskopie elektronowym.



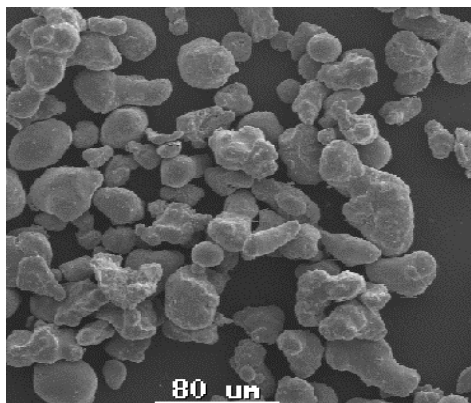
Rys. 1. Obraz mikroskopowy proszku żelaza

Fig. 1. SEM image of Fe powder

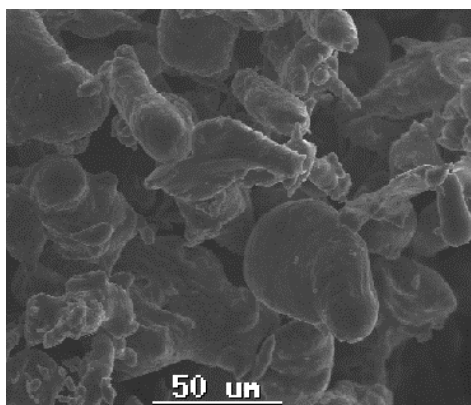


Rys.2. Obraz mikroskopowy proszku stopowego Fe-Mn

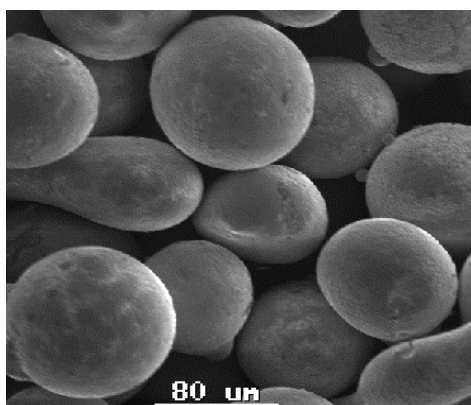
Fig. 2. SEM image of Fe-Mn alloy powder



Rys.3. Obraz mikroskopowy proszku stopowego MT 212
Fig. 3. SEM image of MT 212 alloy powder



Rys. 4. Obraz mikroskopowy proszku Sn-Cu
Fig. 4. SEM image of Sn-Cu powder



Rys. 5 Obraz mikroskopowy proszku stopowego NiCrFe
Fig. 5. SEM image of NiCrFe powder

Wykorzystując przedstawione na rysunkach proszkowe napełniacze metaliczne sporządzono kompozyty polimerowe, których składy jakościowe podano w **Tabeli 2**.

Tabela 2. Składy jakościowe kompozytów

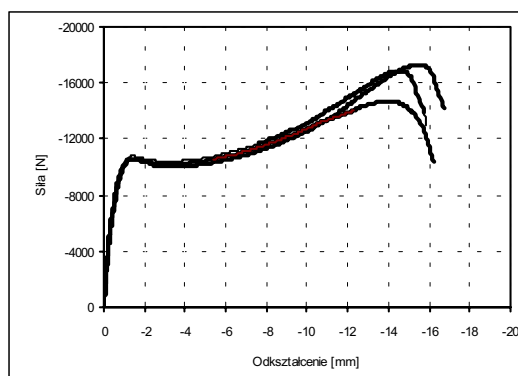
Symbol próbki / Rodzaj napełniacza	A	B	C	D	E	F	G	H
Proszek Fe	X					X	X	X
Proszek Fe-Mn		X				X		
Proszek MT-212			X				X	
Proszek NiCrFe				X				
Proszek Sn - Cu					X			X

Dla opracowanych kompozytów określono podstawowe właściwości fizykomechaniczne temperaturę odkształcenia cieplnego i współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej uzyskując następujące rezultaty.

Tabela 3. Właściwości fizykomechaniczne i cieplne badanych kompozytów polimerowych

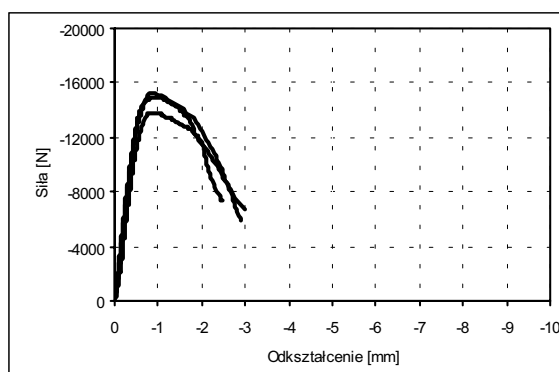
	A	B	C	D	E	F	G	H
Twardość [MPa]	283	260	245	259	222	267	250	255
Udarność [kJ/m²]	3,0	3,7	3,2	2,2	2,1	4,1	3,3	3,3
Ściskanie [MPa]	96	108	100	97	99	121	100	114
Odrywanie [MPa]	22	21	20	18	22	26	21	18
Wsp. α [x10⁻⁶°C⁻¹]	73	70	75	79	77	75	71	73
Temp. ugięcia [°C]	52	51	48	48	49	53	50	52

Na podstawie otrzymanych wyników badań można wnioskować, że czynnikami rzutującymi na właściwości materiałów kompozytowych są cechy napełniacza metalicznego. Badane własności mechaniczne uzależnione są w dużym stopniu od rodzaju napełniacza kształtu i parametrów stereometrycznych.



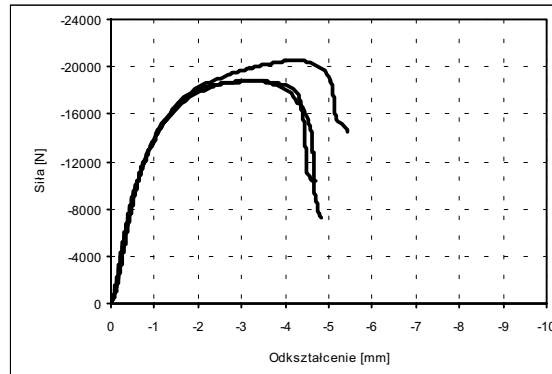
Rys. 6. Krzywe ściskania dla kompozytu napełniaczem Sn-Cu

Fig. 6. Compression characteristics for the composite with Sn-Cu filler



Rys. 7. Krzywe ściskania dla kompozytu z proszkiem NiCrFe

Fig. 7. Compression characteristics for the composite with NiCrFe filler



Rys. 8. Krzywe ściskania dla kompozytu z proszkiem Fe- FeMn

Fig. 8. Compression characteristics for the composite with Fe-FeMn filler

Przedstawione na **Rys 6–8** krzywe ściskania wskazują na dość zróżnicowane właściwości opracowanych materiałów. Porównując ich przebieg można stwierdzić, że kompozyty polimerowe w skład których wchodzi proszki metali o małej spójności wewnętrznej cyna, miedź (**Rys. 6**) odznaczają się pewnymi cechami plastycznymi. Wartość odkształcenia przy, której następuje proces niszczenia próbki wykonanej z tych kompozytów jest kilkakrotnie większa niż dla kompozytu z proszkiem NiCrFe (**Rys.7**) dla których proces kruchego pęknięcia następuje przy znacznie mniejszym odkształceniu. Duża przyczepność do materiału podłoża oraz wysoka wytrzymałość na ściskanie kompozytów zawierających w swoim składzie napełniacz proszkowy żelazo – żelazo-mangan wskazuje, że kompozyt ten posiada cechy niezbędne dla materiału, który może być stosowany na ślizgowe elementy maszyn. Najniższe wskaźniki wytrzymałościowe kompozytów z udziałem proszku NiCrFe wynikają prawdopodobnie z kulistej budowy i regularnego kształtu tego napełniacza.

W materiałach kompozytowych z ciekłą osnową wytrzymałość połączenia między komponentami niezależnie od stopnia rozwinięcia powierzchni (adhezja mechaniczna, większa liczba wiązań i punktów styczności osnowy z napełniaczem powoduje zwiększenie sztywności makrocząsteczek kompozytu i zwiększenie energii jego degradacji mechanicznej) uwarunkowana jest także procesem zwilżania i możliwością wystąpienia między komponentami oddziaływań chemicznych, elektrycznych i dyfuzyjnych. Procesy te z kolei uzależnione są od wielkości energii powierzchniowej napełniaczy. Dla pełniejszego wyjaśnienia przyczyn zróżnicowanych wła-

ściwości wytrzymałościowych kompozytów postanowiono, na podstawie pomiarów kąta zwilżania na tensjometrze K-12 firmy Kruss i zmodyfikowanego równania Washburna, dokonać pomiaru swobodnej energii powierzchniowej (SFE) niektórych napełniaczy.

$$\cos\Theta = (m^2/t) \times (\eta/\rho\sigma c)$$

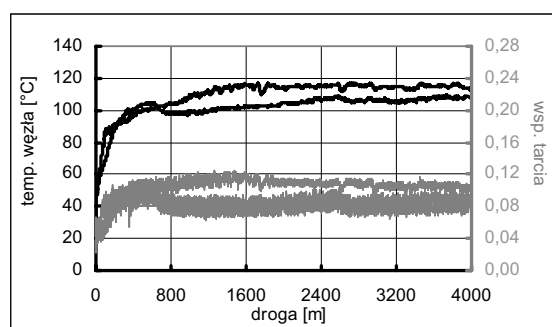
gdzie: t – czas, m – masa cieczy, η – lepkość cieczy, ρ – gęstość cieczy, σ – napięcie powierzchniowe cieczy, Θ – kąt zwilżania proszku, c – stała materiałowa wyznaczana dodatkowymi pomiarami.

Swobodna energia powierzchniowa proszków wynosiła odpowiednio:

- proszek żelaza – 39,31 [mN/m],
- proszek żelazo–mangan – 42,14 [mN/m],
- proszek nikiel–chrom–żelazo – 34,17 [mN/m].

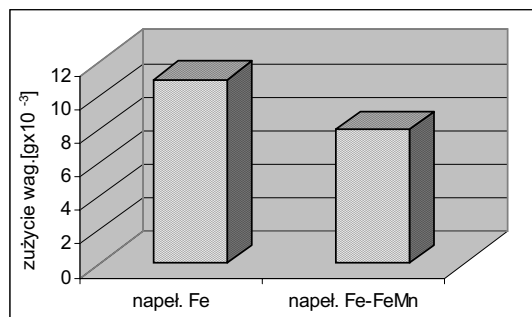
W przypadku proszku NiCrFe napięcie powierzchniowe tego napełniacza jest zbliżone do wartości tego parametru dla osnowy kompozytu powoduje to pogorszenie zwilżalności, zmniejszenie oddziaływań adhezyjnych i w konsekwencji spadek parametrów wytrzymałościowych.

Nałożenie powłoki regeneracyjnej z kompozytu polimerowego powoduje istotne zmiany warunków tarcia a tym samym odmienną specyfikę zużywania. Dla dokonania oceny trwałości skojarzenia ślizgowego przeprowadzono eksperyment tribologiczny na testerze T-05. Celem badań było wyznaczenie charakterystyk tarciowo – zużyciowych wybranych materiałów kompozytowych w następujących warunkach $p = 9$ MPa, $v = 0,3$ m/s, smarowanie jednokrotne smarem plastycznym.



Rys 9. Przebieg zmian temperatury węzła i współczynnika tarcia kompozytów z napełniaczem Fe i Fe-FeMn

Fig. 9. Tribosystem temperature and friction coefficient curves during tribological testing of the composites



Rys. 10. Zużycie wagowe badanych materiałów

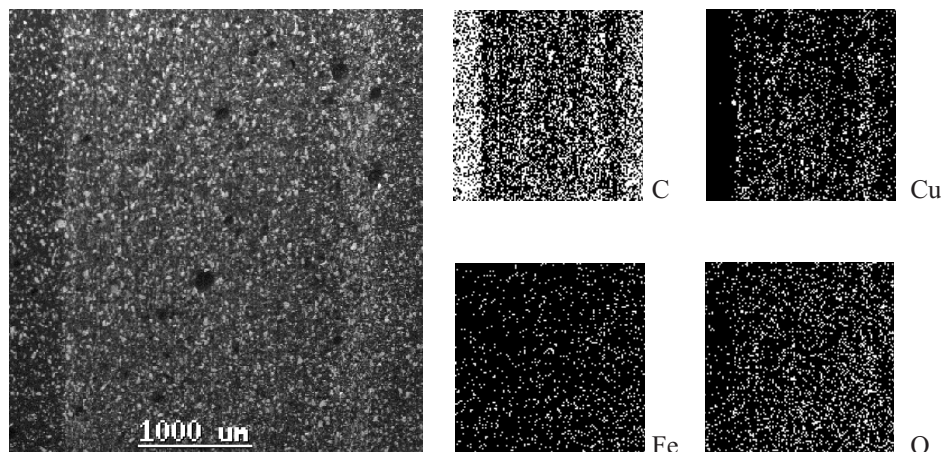
Fig. 10. Wear (mass loss) of the tested composites

Wstępnym testom tarciovo zużyciowym poddano wszystkie z opracowanych kompozytów, najkorzystniejsze wyniki uzyskano dla materiałów z napełniaczem Fe i Fe-FeMn.

Na **Rysunkach 9 i 10** przedstawiono wybrane charakterystyki tribologiczne kompozytów z proszkiem żelaza oraz mieszaniną żelaza i żelazo manganu. Charakterystyki te pokazują stosunkowo dużą stabilność rejestrowanych parametrów. Mniejsze opory ruchu a tym samym niższą temperaturę modelowego węzła tarcia notujemy dla kompozytu z napełniaczem żelazo – żelazo mangan. Kompozyt ten charakteryzuje się również większą odpornością na proces zużywania w porównaniu z kompozytem tylko z proszkiem żelaza. Wyniki uzyskanych badań tribologicznych nad doborem proszkowych napełniaczy metalicznych sugerują w tym przypadku o dobrym przewodnictwie cieplnym tego materiału i małych oddziaływaniach adhezyjnych między ślizgającymi się powierzchniami.

Po eksperymencie tribologicznym przeprowadzono obserwację powierzchni tarcia i mikroanalizę rentgenowską za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego wyniki badań przedstawiono na rysunku.

Rentgenogramy pochodzące z powierzchni próbki kompozytu zawierającego żelazo i żelazo-mangan świadczą o tym, że w czasie procesu tribologicznego zachodzą zjawiska, które prowadzą do wytworzenia na powierzchni kompozytu warstewki składającej się m.in. z węgla, żelaza i miedzi. Wytworzona warstwa wierzchnia przyjmuje funkcję czynnika przeciw zużyciowego i poprawia jakość współpracy tribologicznej.



Rys. 11. Obraz powierzchni rolki kompozytu z napełniaczem Fe-FeMn oraz wyniki mikroanalizy rentgenowskiej na obecność na powierzchni tarcia C, Cu, Fe, O
Fig. 11. SEM image of the worn surface of the composite with Fe-FeMn filler and EDS maps for C, Cu, Fe, O

PODSUMOWANIE

Spośród wprowadzanych do osnowy polimerowej napełniaczy proszkowych najwyższą efektywność uzyskano dla mieszaniny żelaza i żelazo manganu. Otrzymane rezultaty badań pozwalają stwierdzić, że właściwości eksploatacyjne kompozytu polimerowego w istotny sposób zależą od rodzaju, składu chemicznego i parametrów stereometrycznych napełniacza metalicznego. Oprócz wymienionych czynników duży wpływ na właściwości kompozytów polimerowych ma wartość energii powierzchniowej napełniaczy. Decyduje ona o rodzaju i wielkości oddziaływań na granicy faz matryca polimerowa – napełniacz. Proszki metali o rozwiniętej powierzchni, zróżnicowanym składzie oraz charakteryzujące się wysoką energią powierzchniową (proszek FeMn) umożliwiają opracowanie kompozytu o wysokich parametrach wytrzymałościowych, dobrych charakterystykach tribologicznych i wysokiej odporności na zużywanie.

LITERATURA

1. Wilczyński A.P. Polimerowe kompozyty włókniste. PWN Warszawa 1996.
2. Jurkowski B., Jurkowska B.: Sporządzanie kompozycji polimerowych. Elementy teorii i praktyki. WNT Warszawa 1995.

3. Szlezyngier W.: Tworzywa sztuczne. Wydawnictwo Rzeszów 1996.
4. Polak A.: Zwiększenie trwałości i niezawodności par trących przez zastąpienie materiałów łożyskowych tworzywami sztucznymi. Problemy Eksploatacji 6/1995.
5. Capanidis D., Wieleba W., Ziemiański K.: Polimerowe łożyska slizgowe z tworzyw termoplastycznych. Poradnik Tribologii i Tribotechniki. Tribologia 6/1995.
6. Boczkowska A., Kapuściński J., Puciłowski K., Wojciechowski S.: Kompozyty. Oficyna wydawnicza PW Warszawa 2001.
7. Śleziona J.: Podstawy technologii kompozytów. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej Gliwice 1998.
8. Blicharski M.: Wstęp do inżynierii materiałowej. WNT Warszawa 1998.

Recenzent:
Janusz JANECKI

Summary

The authors present an effect of powdered metallic fillers on physico-mechanical, thermal and tribological properties of polymer composites. The aim of the research was to find an influence of chemical composition and stereometry of metallic and alloy particles on features of the composites. Metallic fillers were powders of iron and other metals, and their alloys, as well as mixtures of those components. Physico-mechanical and thermal properties of the developed composites were assessed; tribological properties were determined using a block-on-ring tester (T-05). An analysis of the worn surface was carried out using a scanning electron microscope (SEM) and X-ray spectrometer (EDS). The aim was to determine the surface distribution of some elements in the surface layer.

Paweł PIEC*, Grzegorz ZAJĄC*

WSPOMAGANIE KOMPUTEROWE ANALIZY PROCESU TARCIA

COMPUTER AIDED ANALYSIS OF FRICTION PROCESS

Słowa kluczowe:

wstawki hamulcowe, zużycie, hałas

Key words:

brake inserts, wear, noise

Streszczenie

Przedstawiona w pracy analiza zjawisk kontaktowych towarzyszących procesowi tarcia bazuje na wynikach badań eksploatacyjnych, stanowiskowych i laboratoryjnych przy szerokiej aplikacji programów komputerowych. Wspomaganie komputerowe procesu tarcia pozwala na selektywne wyodrębnienie szerokiej gamy parametrów mających wiodący wpływ na inicjowanie i rozwój podstawowych zjawisk towarzyszących procesowi tarcia. Ingerencja komputerowa w opis i analizę zjawisk towarzyszących tarcia pozwala na wydzielenie mikroprocesów, które kształtują makroobraz

* Politechnika Krakowska.

zmian w warstwie wierzchniej współpracujących elementów i zespołów maszyn i pojazdów. Całość pracy oparta jest na wynikach własnych badań, popartych wizualną symulacją komputerową.

Praca zawiera wybrane wyniki badań wpływu właściwości tribologicznych elementów trących, wstawki klocka hamulcowego i koła, na poziom emisji hałasu. W badaniach uwzględniono wstawki żeliwne stosowane w pojazdach szynowych oraz wstawki kompozytowe i prasowane z proszków metali

WPROWADZENIE

W procesie tarcia suchego wyróżnia się zakres względnego spoczynku (tarcie spoczynkowe) oraz zakres makroskopowego ruchu (tarcie ślizgowe).

Podział tarcia na spoczynkowe i ślizgowe bazuje na zasadzie wzajemnego zaczepiania ciał sztywnych. Przyjęta zasada dla ciał sztywnych pozwala na jednoznaczny rozdział między spoczynkiem i poślizgiem. Natomiast w przypadku ciał rzeczywiście elastycznych, w obszarze spoczynku, w chwili zadziałania siły stycznej występują pewne mikroprzesunięcia. Pomiar tarcia spoczynkowego są więc w pewnym zakresie pomiarami tarcia ślizgowego przy małych prędkościach i z tego też powodu niektórzy autorzy nie uwzględniają tarcia spoczynkowego (Simkins (1967) [L. 9], Sargent (1974) [L. 8]). Podział na obszary przyczepności i poślizgu jest więc idealnym rozważaniem – pewnym przybliżeniem rzeczywistych właściwości. Tarcie ślizgowe wynika z ruchu względnego warstw wierzchnich dwóch elementów pozostających w kontakcie. Według elementarnej teorii Coulomba współczynnik tarcia ślizgowego μ jest niezależny od wartości prędkości względnej. Wektor \vec{F}_T siły tarcia ma kierunek działania, zależny od kierunku działania prędkości względnej \vec{v}_r :

$$\vec{F}_T = -\mu \cdot F_N \cdot \text{sgn}\left(\frac{\vec{v}_r}{|\vec{v}_r|}\right) \quad (1)$$

którego wartość liczbową oblicza się wg wzoru (4.2):

$$F_T = -F_N \cdot \text{sgn}(v_r) \quad (2)$$

Tarcie ślizgowe określone jest przede wszystkim przez procesy adhezji oraz sprężyste i plastyczne deformacje. Podczas względnego ruchu

dochodzi do sprężystych i plastycznych deformacji w warstwach wierzchnich nierówności, rozrywania mostków zgrzewanych na zimno, jak również ścinanie wzniesień materiału. Wszystkie składowe mechanizmy powstające w miejscu styku powodują powstawanie siły oporu. W następstwie rozpraszania energii w miejscu styku dochodzi do podwyższenia temperatury, która oddziałuje na siłę tarcia. Zależność siły tarcia od prędkości względnej i siły normalnej dla quasistacjonarnych warunków opisuje równanie (2).

Ze wzrostem prędkości względnej czas kontaktu stykających się obszarów warstwy wierzchniej ulega zmniejszeniu, co powoduje spadek siły tarcia. Zależność tę ujmuje Kragielski (1968) [L. 4] równaniem (3), wyrażającym współczynnik tarcia w funkcji prędkości $\mu = \mu(v_r)$:

$$\mu = 0,6 \cdot \frac{16 \cdot k + 100}{80 \cdot k + 100} \cdot \frac{100}{30 \cdot v + 100} \quad (3)$$

gdzie: k – docisk klocka żeliwnego do koła w MPa, v – prędkość w km/h.

W pracach Bowdena i Lebera (1939) [L. 2] oraz Bowdena i Tabora (1939) [L. 1] zwrócono uwagę na fakt, że poślizg sztywnego ciała po podłożu nie odbywa się w sposób płynny, ale skokowy. Jeżeli wzrasta siła tarcia wraz ze spadkiem prędkości względnej, to powstają drgania samowzbudne, nazywane drganiami stick-slip (przyleganie-poślizg).

Wiele przeprowadzonych badań wskazuje na istotny wpływ właściwości tribologicznych materiałów par ciernych klockowego układu hamulcowego na parametry wibroakustyczne pojazdu szynowego. Odniesienie poziomu natężenia dźwięku, podczas hamowania pojazdu, do charakterystyk tarciovo-zużyciowych materiałów, stosowanych na wstawki hamulcowe, wykazało istniejącą zależność tego zjawiska od cech konstrukcyjno-technologicznych wstawki hamulcowej. Znając te zależności, można stymulować zużyciem oraz natężeniem emitowanego dźwięku, który jest nieodłącznym zjawiskiem towarzyszącym procesowi tarcia podczas hamowania pojazdu.

BADANIA WPLYWU MATERIAŁU WSTAWKI HAMULCOWEJ NA POZIOM HAŁASU

Jak zauważono we wcześniejszych doświadczeniach czynnikiem bardzo istotnie wpływającym na poziom emisji hałasu podczas procesu hamowania są własności materiału wstawki hamulcowej. Dlatego podczas badań

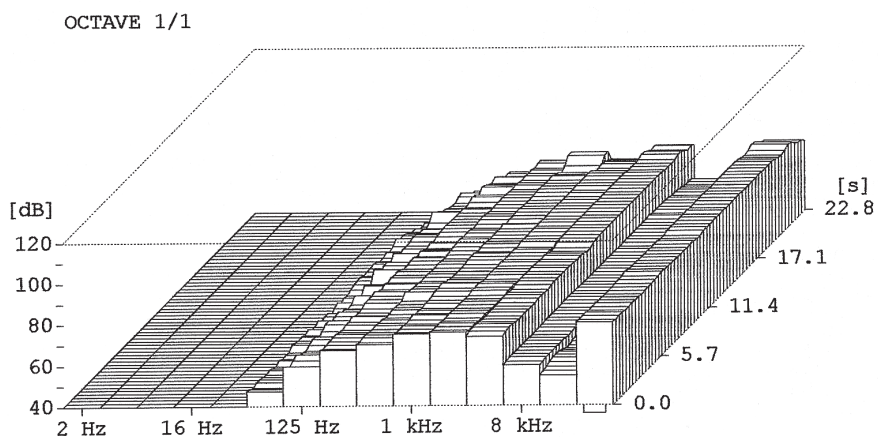
tribologicznych przeprowadzonych przy użyciu testera T-05, (**Rys.1**) dokonano pomiaru poziomu dźwięku mikrofonem pojemnościowym typu SV 02/C4 z przedwzmacniaczem mikrofonowym 1/2" typu SV01A podłączonym do cyfrowego analizatora i miernika dźwięku typu SVAN 912 AE.



Rys. 1. Stanowisko badawcze tester T-05 z aparaturą pomiarową

Fig. 1. Test bench tester T-05 with measuring equipment

Pomiar przeprowadzono dla włączonego filtra typu A, charakterystyki dynamicznej oznaczonej F, oraz liniowego uśrednienia. Mikrofon umieszczo-

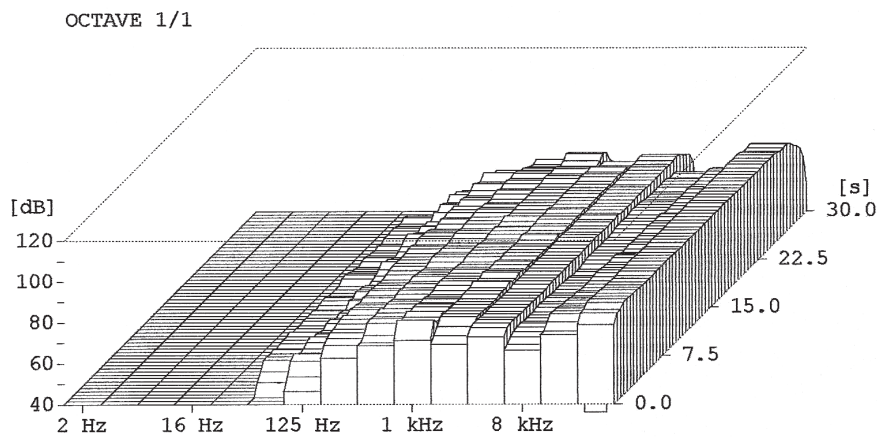


Rys. 2. Analiza oktawowa poziomu hałasu w funkcji czasu: wstawka kompozytowa, prędkość względna 8.8 m/s, nacisk 1 MPa

Fig.2. Noise level octave analysis in function of time for composite insert: relative velocity 8.8 m/s, pressure 1 MPa

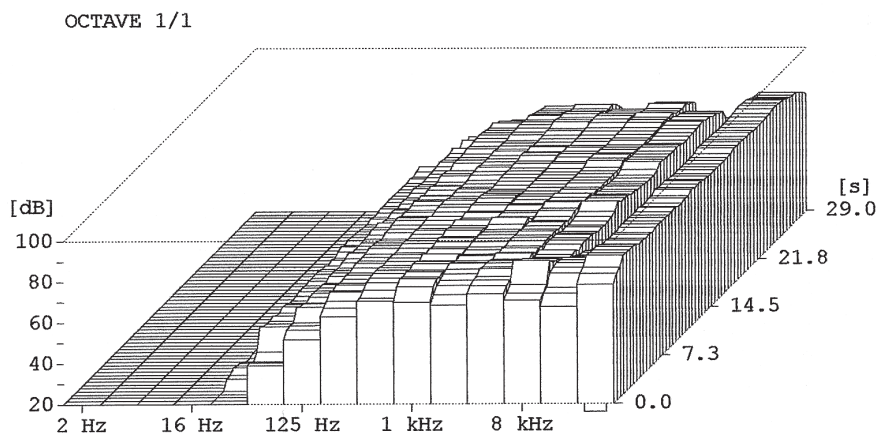
wiony w płaszczyźnie prostopadłej do osi obrotu obręczy zamocowano na statywie w odległości ok. 10 mm od miejsca współpracy klocka z obręczą.

Na **Rys. 2**, **Rys. 3** i **Rys. 4** zamieszczono wyniki analizy oktaawowej poziomu hałasu w funkcji czasu – kolejno dla wstawki kompozytowej, z materiału spiekanego oraz wstawki żeliwnej.



Rys. 3. Analiza oktaawowa poziomu hałasu w funkcji czasu: wstawka z materiału spiekanego, prędkość względna 8.8 m/s, nacisk 1 MPa

Fig.3. Noise level octave analysis for insert from sintered material: relative velocity 8.8 m/s, pressure 1 MPa

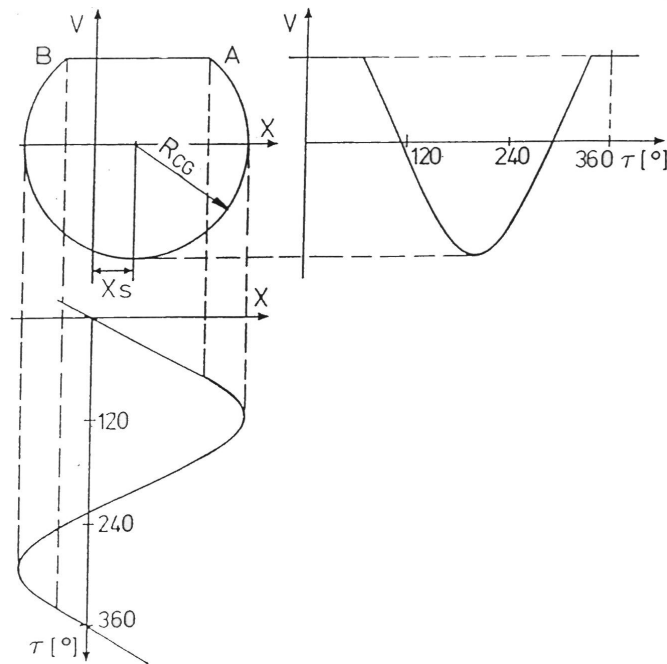


Rys. 4. Analiza oktaawowa poziomu hałasu w funkcji czasu: wstawka żeliwna, prędkość względna 8.8 m/s nacisk 1 MPa

Fig. 4. Noise level octave analysis for cast iron insert in function of time: relative velocity 8.8 m/s, pressure 1 MPa

Z przeprowadzonych badań wynika, iż najwyższym poziomem hałasu, niezależnie od prędkości względnej i nacisku, charakteryzowały się wstawki wykonane z żeliwa P10. Generowały one hałas na poziomie kilka dB wyższym od wstawek wykonanych z materiałów kompozytowych.

Zamieszczone w pracy [L. 5, 6] wyniki badań (Rys. 5) dowodzą, że wykonując wstawki hamulcowe z materiału o charakterystyce współczynnika tarcia „ $\mu_s = \mu_k; \mu_k = \text{const}$ ” (jakim charakteryzują się niektóre materiały kompozytowe) możemy wpływać na proces zjawisk kontaktowych typu stick-slip – eliminując w tym przypadku fazę stick, czyli odcinek „A–B” przybiera kształt łuku o promieniu R_{CG} . Przeciwdziała się w ten sposób powstawaniu drgań samowzbudnych. W efekcie wyeliminowania drgań samowzbudnych, w strefie tarcia koła z klockiem hamulcowym, przeciwdziałamy powstawaniu zużycia falistego koła, a tym samym wpływamy na obniżenie poziomu emisji hałasu – tak podczas hamowania jak i normalnej jazdy pojazdu szynowego.



Rys. 5. Schemat poglądowy cyklu granicznego analizowanego układu mechanicznego[6]

Fig. 5. Diagram of boundary cycle of the investigated mechanical system

BADANIA TRIBOLOGICZNE

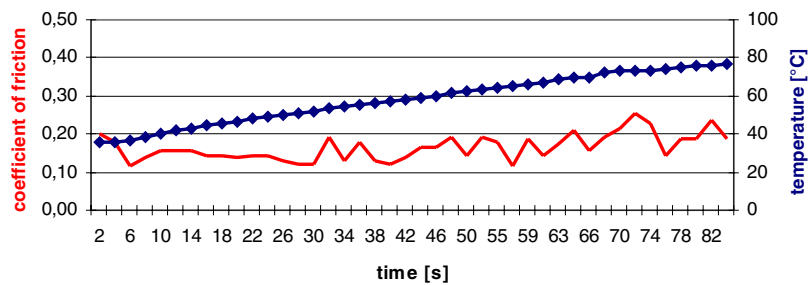
Na stanowisku badawczym tester T-05 wyznaczono wartości i przebiegi zmian współczynnika tarcia ślizgowego w funkcji:

- prędkości,
- czasu,
- temperatury,
- obciążenia.

oraz zmian temperatury wstawki hamulcowej i obręczy w funkcji:

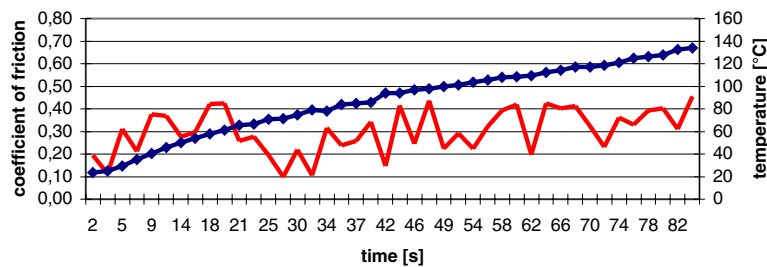
- czasu,
- prędkości,
- obciążenia.

W pracy zamieszczono wybrane przebiegi zmian wartości współczynnika tarcia i temperatury w funkcji czasu, **Rys. 6** i **Rys. 7**, dla wstawki kompozytowej i żeliwnej.



Rys. 6. Wykres przebiegu zmian wartości współczynnika tarcia i temperatury w funkcji czasu – wstawka kompozytowa

Fig. 6. Diagram of coefficient of friction and temperature curves in the function of time – composite insert

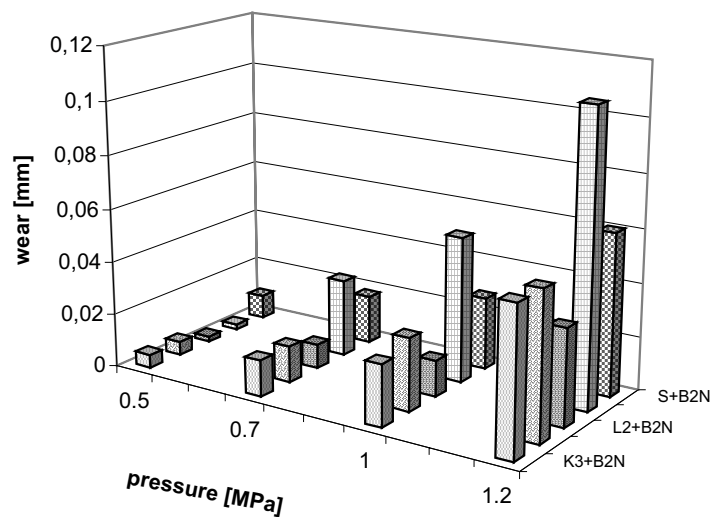


Rys. 7. Wykres przebiegu zmian wartości współczynnika tarcia i temperatury w funkcji czasu – wstawka żeliwna

Fig. 7. Diagram of coefficient of friction and temperature curves in the function of time – cast iron insert

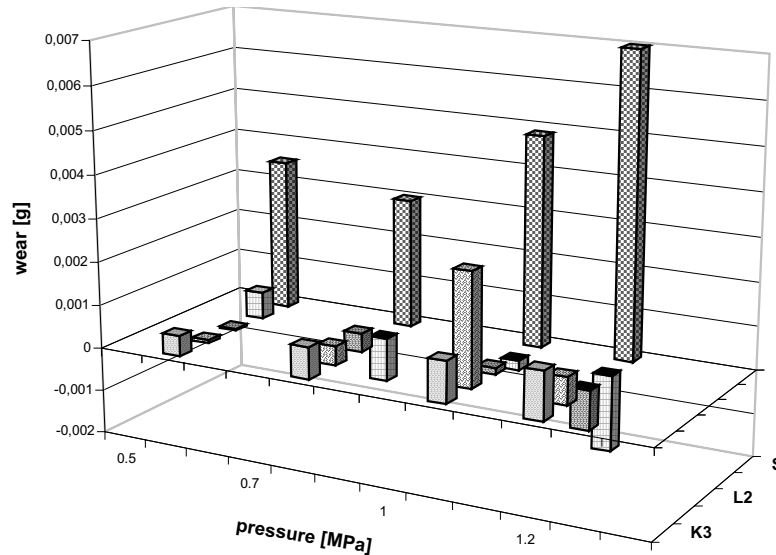
Podczas badań dokonano pomiaru zużycia ściernego dla przeciwpróbki wykonanej z materiału obręczy B2N, a hamowanej przez próbki wykonane z materiałów: żeliwa (P10), materiałów kompozytowych (K1, K3, L2) i materiału spiekane z proszków metali (S). Stopień zużycia określono mierząc zużycie liniowe skojarzenia ciernego wstawka-obręcz oraz ważąc ubytki masowe. Przykładowe zestawienie wybranych wyników badań zużycia liniowego wstawek z materiałów K1, K3, L2, P10, S dla nacisków 0.5, 0.7, 1 i 1.2 MPa przedstawiono na **Rys. 8**. Na **Rys. 9** zamieszczono wyniki pomiaru zużycia wagowego obręczy hamowanych przez wstawki K1, K3, L2, P10 i S przy naciskach 0.5, 0.7, 1 i 1.2 MPa.

Na podstawie przeprowadzonych badań, oceny wagowego i liniowego zużycia, można stwierdzić, że największą intensywnością zużycia charakteryzuje się żeliwo P10. Ponadto przy naciskach 0.7, 1 i 1.2 MPa stwierdzono naniesienia materiału wstawki żeliwnej na powierzchnię współpracującej z nią obręczy. Najintensywniej zużywała się obręcz podczas hamowania wstawką wykonaną z materiału S. Najmniejsze zużycie wagowe jak i liniowe wykazywał materiał kompozytowy L2 oraz skojarzona z nim obręcz.



Rys. 8. Średnie zużycie liniowe wstawek z materiałów K1, K3, L2, P10, S dla nacisków 0.5, 0.7, 1, 1.2 MPa i drogi tarcia 1000 m

Fig. 8. Mean linear wear of inserts from materials K1, K3, L2, P10, S for pressure 0.5, 0.7, 1, 1.2 MPa and for 1000 m of friction distance



Rys. 9. Średnie zużycie wagowe obręczy hamowanych przez wstawki K1, K3, L2, P10, S dla nacisków 0.5, 0.7, 1, 1.2 MPa i drogi tarciaa 1000 m

Fig. 9. Mean wear by weight of rims braked by inserts K1, K3, L2, P10 S for pressure 0.5, 0.7, 1, 1.2 MPa and for 1000 m friction distance

ZAKOŃCZENIE

Wstawki hamulcowe żeliwne, dla których wartość współczynnika tarcia maleje wraz ze spadkiem prędkości względnej podczas tarcia, generowały hałas na poziomie o kilka dB wyższym w porównaniu ze wstawkami z materiałów kompozytowych. Współczynnik tarcia wstawek kompozytowych wykazuje stałą wartość – niezależną od zmiany prędkości względnej trących elementów.

Przeprowadzone badania [L. 3, 5, 6, 10, 11] wykazały, a zamieszczone w pracy wyniki badań stanowiskowych i laboratoryjnych potwierdziły, że poziom natężenia dźwięku, generowany przez pojazd szynowy, zależy, w znacznym stopniu, od cech konstrukcyjno-technologicznych stosowanych wstawek hamulca klockowego. Zastosowanie kompozytowych wstawek w hamulcach klockowych pojazdów szynowych wpłynie korzystnie na komfort akustyczny podczas jazdy.

Wstawki kompozytowe, w porównaniu z wstawkami żeliwnymi, wykazują mniejszą intensywność zużycia ściernego, tak wagowego jak i liniowego, badanych materiałów wstawki hamulcowej i koła.

LITERATURA

1. Bowden F.P., Leben L.: *The nature of sliding and the analysis of friction*. „Proc. R. Soc.”, A169, London 1939, pp.371-391.
2. Bowden F.P., Tabor D.: *The area of contact between stationary and between moving surfaces*. „Proc. R. Soc.”, A169, London 1939, pp.91-413.
3. Ehlers H.R., Gärtner E.: Poteziale und Grenzen der klotzbremse im vergleich zur Scheibenbremse Glasers Annalen, nr. 126 6-7/2002 r.
4. Kragielski I. V.: *Triebe i iznos*. Moskwa 1968.
5. Piec P.: Analiza zjawisk kontaktowych typu stick-slip w miejscu styku koła z klockiem hamulcowym. Monografia 187, Politechnika Krakowska, Kraków, 1995.
6. Piec P.: Zjawiska kontaktowe w elementach pojazdów szynowych. Wyd. ITE Radom, BIBLIOTEKA PROBLEMÓW EKSPLOATACJI, Wyd. ITE Radom, . Kraków, 1999 r.
7. Piec P., Zajac G.: Wpływ eksploatacji pojazdów na propagację hałasu. Wyd. ITE Radom, PROBLEMY EKSPLOATACJI, Kwartalnik, nr 1/2002 (44).
8. Sargent L.B.: A Unified Theory of Friction. „ASLE Transactions”, 17(1974).
9. Simkins T.E.: *The Mutuality of Static and kinetic Friction*. Journal of the American Society of Lubrication Engineers, 23(1967).
10. Sitarz M., Piec P., Hełka A., Zajac G.: Badania eksploatacyjne żeliwnych i kompozytowych wstawek hamulcowych. Wyd. Politechniki Śląskiej, Zeszyty Naukowe, seria TRANSPORT, z.43, 2001 r.
11. Willenbrink L.: Neurer Erkenntnisse zur Schallabstrahlung von Schienenfahrzeuge. Eisenbahntechnische Rundschau, Nr 5, 1979.
12. Zalewski R.: Obecne zagrożenia środowiska naturalnego przez kolej i sposoby zaradcze. Drogi Kolejowe, nr 8, 9/1990.

Recenzent:

Marian SZCZEREK

Summary

The analysis of contact phenomena that accompany the process of friction is based on the results of operational and laboratory test bench investigations aided by the application of computer programs. The computer aided analysis of the process of friction allows a selective identification of a broad range of parameters which are decisive for the initiation and propagation of the basic phenomena connected with friction. Computer interference in the description and analysis of the phenomena accompanying friction makes it possible to separate the

microprocesses which shape the macro-picture of the changes that occur in the outer layer of the interacting elements and units of machines and vehicles. The article is based on the results of the authors' research, supported by visual computer simulation.

The article includes some results of tests on the effect of tribological properties of friction elements, brake shoe insert and wheel, on the level of noise. In the experiments the inserts made from cast iron, used in rail vehicles were investigated, as well as composite inserts and pressed from metal powders.

Witold PIEKOSZEWSKI* , Waldemar TUSZYŃSKI*

**WŁAŚCIWOŚCI PRZECIWZUŻYCIOWE,
PRZECIWZATARCIOWE I TRWAŁOŚĆ
ZMĘCZENIOWA WĘZŁA TARCIA JAKO EFEKT
RODZAJU I STĘŻENIA DODATKÓW
SMARNOŚCIOWYCH W OLEJU**

**AN EFFECT OF THE TYPE AND CONCENTRATION
OF LUBRICATING ADDITIVES ON AW/EP PROPERTIES
AND ROLLING FATIGUE LIFE OF A TRIBOSYSTEM**

Słowa kluczowe:

Aparat czterokulowy, właściwości przeciwzużyciowe, właściwości przeciwzatarciowe, trwałość zmęczeniowa, dodatki AW, dodatki EP, SEM, EDS

Key-words:

Four-ball tester, AW properties, EP properties, rolling fatigue life, AW additives, EP additives, SEM, EDS

* Instytut Technologii Eksploatacji (ITeE), Zakład Tribologii, ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, tel. (0-48) 36-442-41.

STRESZCZENIE

W artykule zamieszczono wyniki tribologicznych badań serii olejów smarowych o zmienianym w sposób modelowy składzie chemicznym. Olejem bazowym był olej mineralny. Olej ten mieszano z handlowymi pakietami dodatków smarnościowych różnego typu. Były to dwa różne pakiety dodatków przeciwzużyciowych (typu AW) i dwa pakiety dodatków przeciwzatarciowych (typu EP). Dodatki przeciwzużyciowe zawierały dialkilditiofosforan cynku – ZDDP, zaś przeciwzatarciowe – organiczne związki siarkowo–fosforowe. Dodatki smarnościowe dodawano do oleju bazowego w różnych stężeniach.

Badania tribologiczne wykonano za pomocą dwóch aparatów czterokulowych, wytworzonych w ITeE. Aparat T–02 posłużył do wyznaczenia właściwości przeciwzużyciowych i przeciwzatarciowych smarowanego badanymi olejami węzła tarcia. Aparat czterokulowy T–03 umożliwił wykonanie badań trwałości zmęczeniowej (pittingu).

Wykazano, że dodatki AW polepszają nie tylko właściwości przeciwzużyciowe smarowanego nimi węzła tarcia, ale dodatkowo – dodane w niewielkiej ilości – wpływają korzystnie na trwałość zmęczeniową. Zwiększenie stężenia dodatków AW w oleju bazowym pozwala znacząco poprawić właściwości przeciwzużyciowe, ma jednak niekorzystny wpływ na trwałość zmęczeniową.

Dodatki EP, dodane nawet w niewielkim stężeniu do oleju bazowego, powodują kilkukrotną poprawę właściwości przeciwzatarciowych oraz w znacznie mniejszym stopniu, przeciwzużyciowych, praktycznie nie wpływając przy tym jednak na trwałość zmęczeniową. Zwiększenie stężenia tych dodatków skutkuje polepszeniem właściwości przeciwzatarciowych, jak też przeciwzużyciowych. Towarzyszy temu jednak znaczny spadek trwałości zmęczeniowej.

Wyniki badań tribologicznych zinterpretowano w oparciu o analizy powierzchni tarcia za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) i mikroanalizatora rentgenowskiego (EDS).

WPROWADZENIE

Smarowanie większości węzłów tarcia, np. szybkoobrotowych przekładni zębatych, nie jest smarowaniem „czysto” hydrodynamicznym (HD) czy elastohydrodynamicznym (EHD). Chociaż większa część

obciążenia przenoszona jest przez film olejowy, nie można w pełni uniknąć kolizji najwyższych wierzchołków nierówności powierzchni [L. 1]. Wówczas, po zniszczeniu warstewek tlenków na powierzchni, może dojść do szczepień adhezyjnych, które na skutek wzajemnego ruchu elementów trących są zrywane. To w konsekwencji powoduje uszkodzenie powierzchni. Jeżeli proces ten nie zostanie zahamowany, następuje zmiana skali uszkodzenia z mikro na makroskopową – elementy trące ulegają *zacieraniu* [L. 2]. Na zacieranie narażone są te części maszyn, które podczas wzajemnego ruchu pracują w warunkach dużych poślizgów, np. strefa głowy i stopy zęba w przekładniach.

Jeżeli elementy wykonują ruch toczny lub toczny z niewielkim poślizgiem (dwa zęby przekładni zębatej stykające się w tzw. środku zazębienia czy łożyska toczne), a styk jest smarowany, to może dojść do odmiennej formy zużycia zwanej *pittingiem* [L. 3].

Pitting związany jest ze zmęczeniem materiału warstwy wierzchniej wywołanym cyklicznym obciążeniem styku, w wyniku czego powstają szczeliny. W szczeliny pod wysokim ciśnieniem (smarowanie EHD) wtłaczany jest olej, wskutek czego ulegają one rozklinowaniu. Ostatecznie, na skutek zmiennych naprężeń następuje wykruszenie cząstki materiału [L. 4, 5, 6].

Zarówno zacieranie, jak i zużycie zmęczeniowe (pitting) są uzależnione od wielu różnych czynników. Są to: właściwości materiału, sposób obróbki powierzchni, konstrukcja węzła tarcia, warunki eksploatacji oraz właściwości fizykochemiczne zastosowanego środka smarowego. Dla pierwszych czterech czynników zależność odporności węzła tarcia na zacieranie i zmęczenie jest stosunkowo dobrze rozpoznana. Mniej jednoznacznych informacji dostępnych jest natomiast na temat wpływu środków smarowych, szczególnie w aspekcie ich interakcji z warstwą wierzchnią elementów trących.

Wiadomo, że w celu zapobiegania zużyciu i zacieraniu należy zwiększyć lepkość oleju smarowego [L. 3] i/lub zastosować w oleju pakiet dodatków smarnościowych [L. 7, 8], przy czym mogą to być dodatki przeciwzużyciowe, typu *AW* lub przeciwzatarciowe, typu *EP* [L. 9]. W pracach [L. 10, 11] potwierdzono, że zwiększenie ilości dodatków, szczególnie *EP*, w oleju smarowym znacząco podnosi odporność węzła tarcia na zacieranie.

Jeśli chodzi o wpływ dodatków smarnościowych na trwałość zmęczeniową węzła tarcia, to prezentowane w literaturze informacje są często

sprzeczne. Przyjmuje się najczęściej, że obecność dodatków typu EP w oleju smarowym obniża trwałość zmęczeniową [L. 12]. Tymczasem w pracy [L. 13] podano, że tego typu dodatki pozwalają tę trwałość podwyższyć. Podobne wyniki – w odniesieniu do dodatków typu AW – zaprezentowano w artykule [L. 14], gdzie stwierdzono ich pozytywny wpływ na trwałość zmęczeniową. Różnice te wynikają z różnorodnych stosowanych węzłów tarcia i warunków badań.

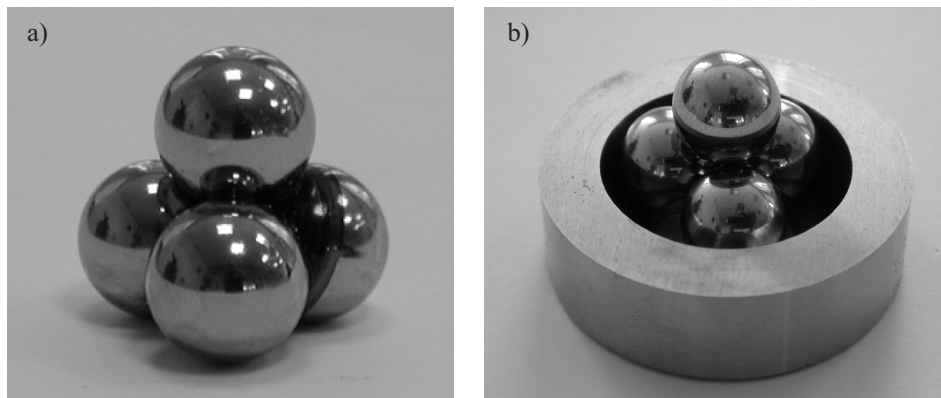
Zaistniała zatem potrzeba wykonania kompleksowych badań zależności właściwości przeciwzużyciowych, przeciwzatarciowych i trwałości zmęczeniowej od rodzaju i stężenia dodatków smarnościowych w oleju, przy zastosowaniu tego samego typu węzła tarcia i w tych samych warunkach.

APARATURA BADAWCZA I ELEMENTY TESTOWE

Badania tribologiczne wykonano za pomocą dwóch aparatów czterokulowych, wytworzonych w ITeE. Aparat T-02 posłużył do wyznaczenia właściwości przeciwzużyciowych i przeciwzatarciowych smarowanego badanymi olejami węzła tarcia, w warunkach ruchu ślizgowego. Zmodyfikowany aparat czterokulowy T-03 umożliwił natomiast wykonanie badań trwałości zmęczeniowej (pittingu), w warunkach ruchu tocznego. Dodać należy, że obecnie aparat czterokulowy jest jednym z najpowszechniej stosowanych urządzeń do tribologicznych badań olejów smarowych [L. 9, 15].

Oba urządzenia zostały wyposażone w skomputeryzowane systemy sterująco-pomiarowe. Aparat T-03 wyposażony był dodatkowo w detektor drgań. W momencie wystąpienia wykruszenia materiału na jednej z kulek poziom drgań gwałtownie wzrastał, a odpowiedni sterownik automatycznie wyłączał urządzenie.

Elementami testowymi w obu przypadkach były kulki łożyskowe o średnicy nominalnej 1/2", wykonywane ze stali łożyskowej ŁH15. Chropowatość powierzchni wynosiła $R_a = 0,032 \mu\text{m}$, a twardość 60–65 HRC. Różnica w węźle tarcia polegała na tym, że w aparacie do badania zużycia i zacierania (T-02) dolne kulki zaciśnięte były w uchwycie tak, aby nie mogły się obracać – **Rys. 1 a**). Obracała się tylko kulka górna. W przypadku aparatu T-03 do badania pittingu dolne kulki swobodnie toczyły się po bieżni – **Rys. 1 b**).



Rys. 1. Węzeł tarcia aparatu czterokulowego: a) T-02, b) T-03

Fig. 1. Four-ball tribosystem: a) T-02 apparatus, b) T-03

Po wykonaniu badań tribologicznych analizowano powierzchnię śladu zużycia za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) i spektrometru z dyspersją energii (EDS).

METODYKA BADAŃ

Do scharakteryzowania właściwości przeciwzużyciowych wykorzystano tzw. *graniczne obciążenie zużycia* (G_{oz40}), oznaczane według p. 2.3 normy PN-76/C-04147 [16]. Zmieniono tylko obciążenie węzła i czas trwania biegu. Przyjęto obciążenie 40 kG (392 N) i czas 3600 s – zgodnie z WTWT – 94/MPS-025 [L. 17]. Indeks „40” w G_{oz40} oznacza obciążenie wyrażone w kG. Prędkość obrotowa wrzeciona wynosiła 500 obr/min (prędkość poślizgu 0,19 m/s).

Właściwości przeciwzatarciowe scharakteryzowano za pomocą tzw. *granicznego nacisku zatarcia* (p_{oz}), wyznaczanego w warunkach liniowo rosnącego obciążenia. Badania wykonano według metody własnej, prezentowanej wielokrotnie, np. [L. 10, 11, 18, 19]. Na podstawie dotychczasowych badań stwierdzono, że opracowana nowa metoda charakteryzuje się dobrą rozdzielczością oraz bardzo niską czasochłonnością i kosztem, przy precyzji porównywalnej do osiąganej w najczęściej stosowanych badaniach tribologicznych.

Oznaczenie wskaźnika p_{oz} prowadzono w następujących warunkach: prędkość narastania obciążenia 409 N/s, obciążenie początkowe 0, obciążenie maksymalne ok. 7200 N, prędkość obrotowa wrzeciona 500 obr/min (prędkość poślizgu 0,19 m/s).

Zarówno graniczne obciążenie zużycia (G_{oz40}), jak i graniczny nacisk zatarcia (p_{oz}) odpowiadają nominalnemu naciskowi na powierzchni śladu zużycia pod koniec biegu. Oblicza się je ze wzoru (1):

$$G_{oz40}(p_{oz}) = 0,52 \frac{P}{d^2} \quad [N/mm^2] \quad (1)$$

gdzie: P – w przypadku oznaczania G_{oz40} jest to wartość obciążenia w czasie biegu [N]; dla p_{oz} jest to obciążenie powodujące zatarcie lub obciążenie maksymalne (gdy brak jest zatarcia), d – średnia średnica śladu zużycia [mm].

Im wartości wskaźników G_{oz40} i p_{oz} są wyższe, tym lepsze są odpowiednio przeciwzużyciowe i przeciwzatarciowe właściwości węzła tarcia smarowanego badanym środkiem smarowym.

W celu oznaczenia G_{oz40} i p_{oz} wykonano dla każdego oleju minimum 3 biegi badawcze, których wyniki uśredniono. W przypadku G_{oz40} sposób obróbki statystycznej podano w normie [16], zaś dla p_{oz} – w pracy [L. 11].

Trwałość zmęczeniową scharakteryzowano według normy IP 300/82 [L. 20] za pomocą tzw. *trwałości 10%*, oznaczonej L_{10} . Jest to taki czas eksploatacji tocznych węzłów tarcia (smarowanych badanym olejem), w którym 10% ich populacji ulega uszkodzeniu. Badanie polegało na przeprowadzeniu przy stałym obciążeniu (5886 N) i stałej prędkości obrotowej (1450 obr/min; 0,56 m/s) 24 biegów badawczych czterech stalowych kulek współpracujących tocznie w obecności środka smarowego, sporządzeniu rozkładu Weibulla i na jego podstawie określeniu trwałości węzła tarcia L_{10} . Badania wykonywano do osiągnięcia dla danego środka smarowego 24 takich biegów, które zakończone zostały wystąpieniem wykruszenia na kulce górnej.

BADANE OLEJE

Zbadano serię olejów smarowych o zmienianym składzie chemicznym. Olejem bazowym był olej mineralny (oznaczony B1) o lepkości kinematycznej ok. 11 mm²/s (100°C). Mieszano go z handlowymi pakietami dodatków smarnościowych różnego typu. Były to dwa różne pakiety dodatków przeciwzużyciowych (typu AW), uważanych czasem za częściowo przeciwzatarciowe [L. 21], i dwa pakiety dodatków przeciwzatarciowych (typu EP). Oznaczono je odpowiednio AW1, AW2 oraz EP1 i EP2. Dodatki przeciwzużyciowe zawierały dialkilditiofosforan cynku – ZDDP, zaś przeciwzatarciowe – organiczne związki siarkowo-fosforowe. Dodatki smarnościowe dodawano do oleju bazowego w różnych stężeniach: 0,2

i 3% wag. dla dodatków AW, oraz 1 i 10% wag. dla EP. Wybrane dodatki stosowane są we współczesnych samochodowych olejach przekładniowych.

WYNIKI BADAŃ TRIBOLOGICZNYCH

Pierwszym krokiem było oszacowanie wymuszeń panujących w węźle tarcia w czasie oznaczania poszczególnych wskaźników. Niektórzy autorzy proponują w tym celu wyznaczać tzw. jednostkową moc tarcia (JMT), obliczaną ze wzoru (2) [L. 22, 23]:

$$JMT = \mu p v \quad [\text{MW} / \text{m}^2] \quad (2)$$

gdzie: μ – współczynnik tarcia, p – nacisk [MN/m^2], v – prędkość poślizgu (toczenia) [m/s].

Wyniki obliczeń zebrano w **Tab. 1**. Współczynnik tarcia został wyznaczony na drodze eksperymentalnej, z wyjątkiem sytuacji dla L_{10} , gdzie jego wartość przyjęto z pracy [L. 24] dla łożyska kulkowego. Nacisk p jest równy wartości maksymalnych naprężeń stykowych, obliczanych ze wzorów Hertza. Więcej informacji na temat sposobu wyznaczenia JMT podano w pracy [L. 25].

Tabela 1. Wymuszenia w czterokulowym węźle tarcia, mierzone jednostkową mocą tarcia, dla poszczególnych wskaźników (opis w tekście)

Wskaźnik	Ruch	μ	p [MN/m^2]	v [m/s]	JMT [MW/m^2]
G_{oz40}	ślizgowy	0,100	3447	0,19	65
p_{oz}	ślizgowy	0,260	7218	0,19	357
L_{10}	toczny	0,002	8503	0,56	10

W przypadku ruchu ślizgowego najmniejsze wymuszenia występują przy oznaczaniu granicznego obciążenia zużycia G_{oz40} . Są to tzw. *warunki przeciwwzużyciowe (AW)*, a G_{oz40} jest wskaźnikiem charakteryzującym tzw. *właściwości przeciwwzużyciowe* węzła tarcia. Największe wymuszenia w węźle tarcia występują przy oznaczaniu granicznego nacisku zatarcia p_{oz} . Są to tzw. *warunki przeciwwzatarciowe (EP)*, a p_{oz} jest wskaźnikiem charakteryzującym tzw. *właściwości przeciwwzatarciowe*. Zdecydowanie najmniejsza JMT występuje w przypadku oznaczania trwałości L_{10} dla ruchu tocznego.

Na **Rys. 2** przedstawiono wartości granicznego obciążenia zużycia (G_{oz40}), granicznego nacisku zatarcia (p_{oz}) i trwałości 10% (L_{10}) uzyskane dla badanych olejów. Słupki błędów charakteryzują powtarzalność; dla dwóch pierwszych wskaźników jej wartości są podane odpowiednio w normie PN-76/C-04147 [16] i pracy [11]. Dla trwałości zmęczeniowej brak jest danych na temat powtarzalności.

Uzyskane wyniki badań tribologicznych pozwalają stwierdzić, że dodatki AW są skuteczniejsze w warunkach niskich wymuszeń niż dodatki EP. Oznacza to nie tylko, że dodatki AW polepszają właściwości przeciwzużyciowe smarowanego nimi węzła tarcia (G_{oz40}), ale dodatkowo – dodane w niewielkiej ilości (0,2%) – wpływają korzystnie na trwałość zmęczeniową (L_{10}). Zwiększenie stężenia dodatków AW w oleju bazowym pozwala znacząco poprawić właściwości przeciwzużyciowe, ma jednak niekorzystny wpływ na trwałość zmęczeniową, co jest szczególnie widoczne dla pakietu AW1.

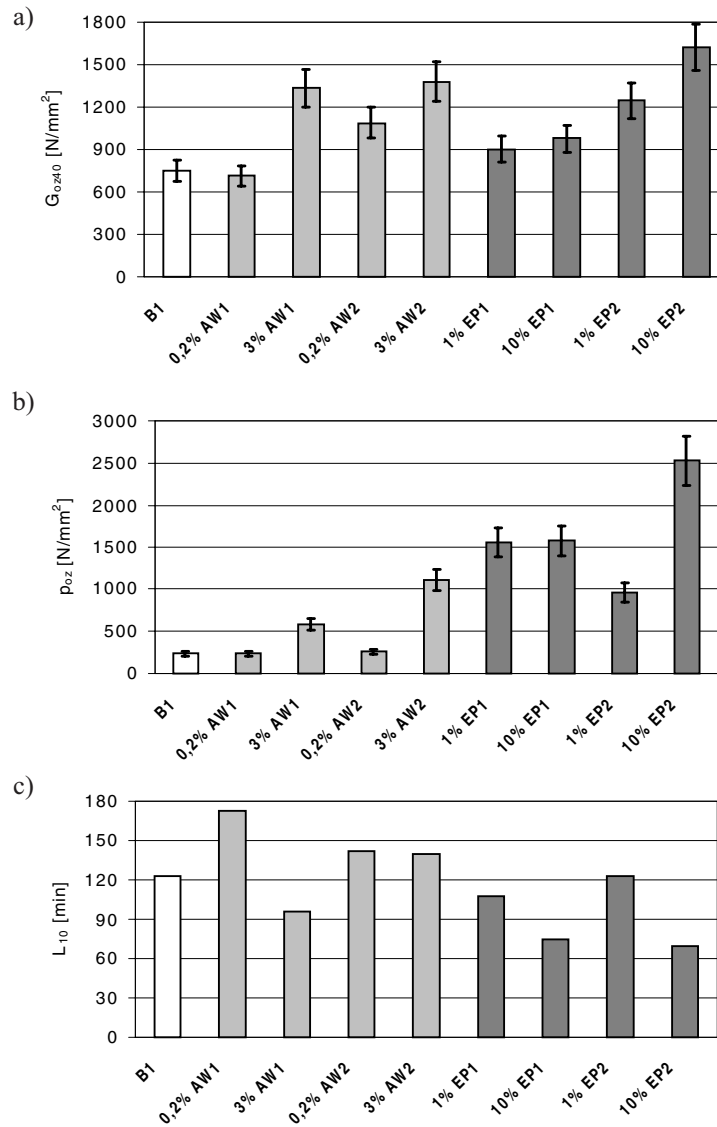
Dodatki EP, przy wysokich wymuszeniach, wykazują znacznie większą efektywność działania niż AW. Dodanie nawet w niewielkim stężeniu (1%) dodatków EP do oleju bazowego powoduje kilkukrotną poprawę właściwości przeciwzatarciowych (p_{oz}) oraz, w znacznie mniejszym stopniu, przeciwzużyciowych, praktycznie nie wpływając przy tym jednak na trwałość zmęczeniową. Zwiększenie stężenia tych dodatków skutkuje polepszeniem właściwości przeciwzatarciowych, jak też przeciwzużyciowych. Jest to szczególnie widoczne dla pakietu EP2. Towarzyszy temu jednak znaczny spadek trwałości zmęczeniowej.

DYSKUSJA WYNIKÓW

Dla interpretacji otrzymanych wyników badań tribologicznych wykonano ilościową mikroanalizę rentgenowską za pomocą spektrometru EDS zintegrowanego ze skaningowym mikroskopem elektronowym (SEM). Przed badaniami elementy testowe myto w 95% n-heksanie w myjce ultradźwiękowej.

Na **Rys. 3** do **5** zaprezentowano zawartość siarki, fosforu i cynku w warstwie wierzchniej śladu zużycia po badaniu w różnych warunkach. **Rys. 3** i **4** dotyczą analizy śladu zużycia na jednej z kul dolnych po badaniach w warunkach odpowiednio przeciwzużyciowych (oznaczanie G_{oz40}) i przeciwzatarciowych (oznaczanie p_{oz}). **Rys. 5** dotyczy analizy ścieżki zużycia na kulce górnej w pobliżu miejsca wykruszenia materiału, po badaniach zmęczeniowych (oznaczanie L_{10}). Dodatki EP nie zawierały w swoim składzie cynku, dlatego na **Rys. 3 c** do **5 c**) prawe strony wykresów są puste.

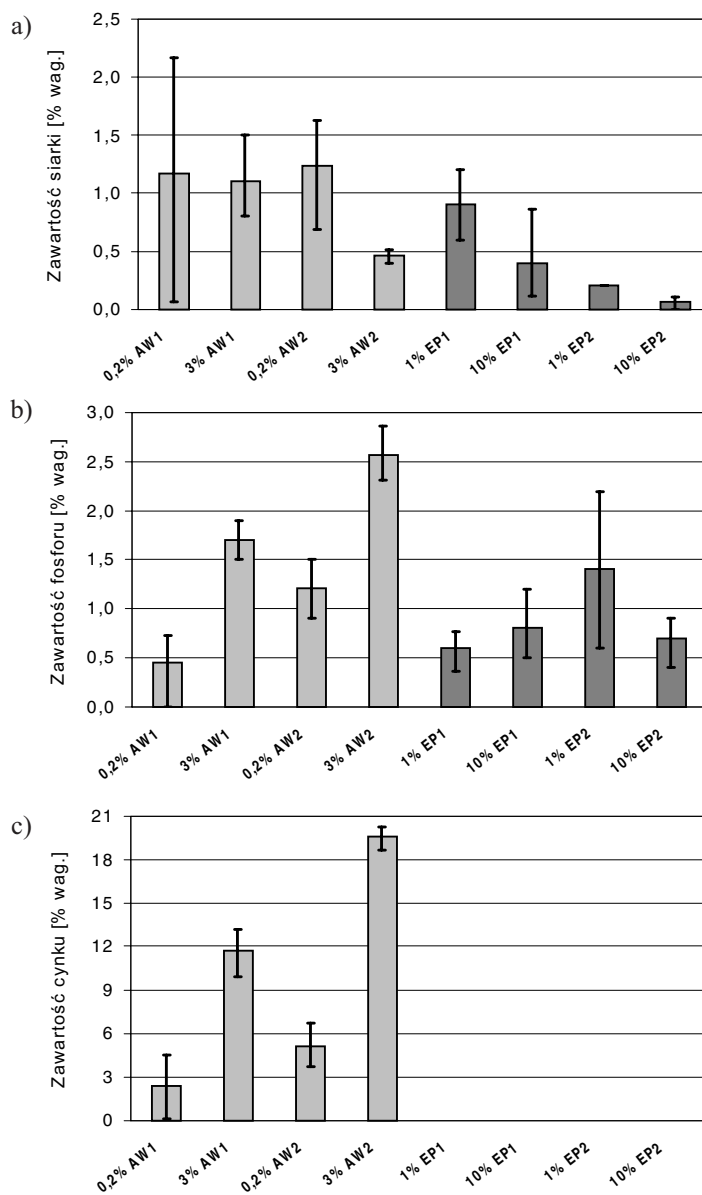
Analizy wykonywano 3 razy – za każdym razem w innym miejscu śladu zużycia. Na wykresach podano wartości średnie oraz różnice pomiędzy zaobserwowaną minimalną i maksymalną zawartością poszczególnych



Rys. 2. Właściwości tribologiczne, otrzymane dla poszczególnych olejów, charakteryzowane za pomocą: a) granicznego obciążenia zużycia G_{oz40} , b) granicznego nacisku zatarcia p_{oz} , c) trwałości 10% L_{10}

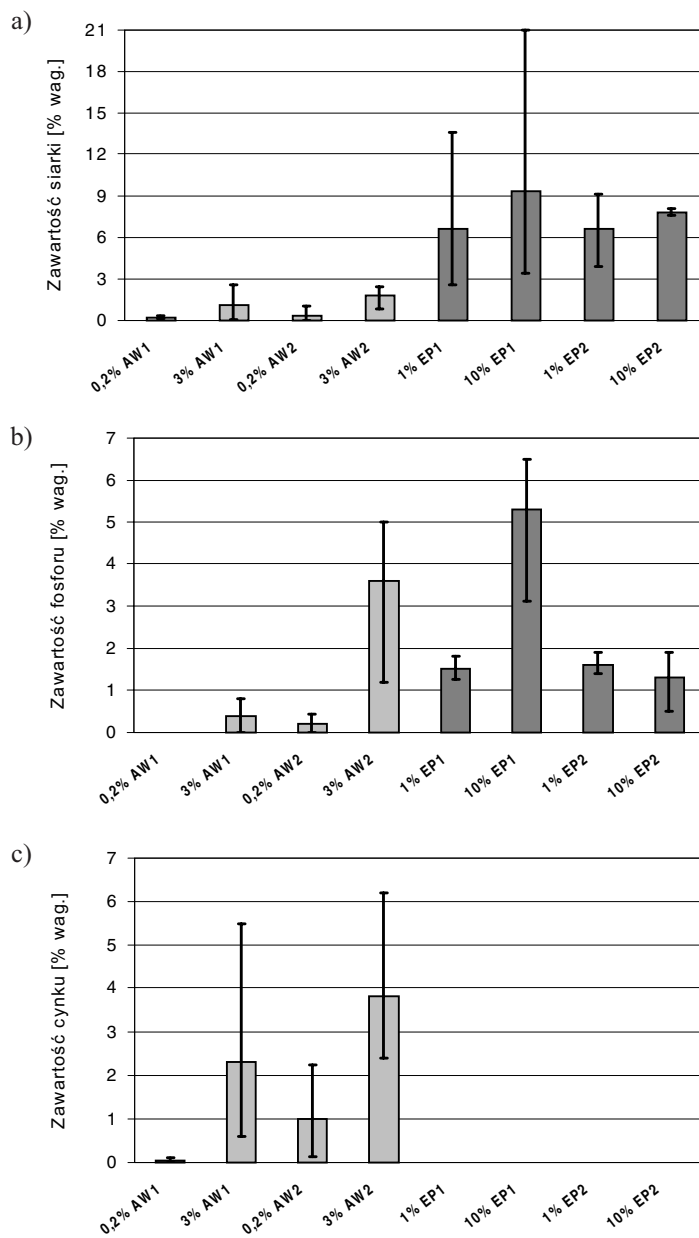
Fig. 2. Tribological properties obtained for the tested oils, measured by: a) limiting pressure of wear G_{oz40} , b) limiting pressure of seizure p_{oz} , c) fatigue life L_{10}

pierwiastków w różnych miejscach. Rozrzuty te świadczą zatem nie o błędzie pomiaru, ale o stopniu niejednorodności składu pierwiastkowego powierzchni śladu zużycia.



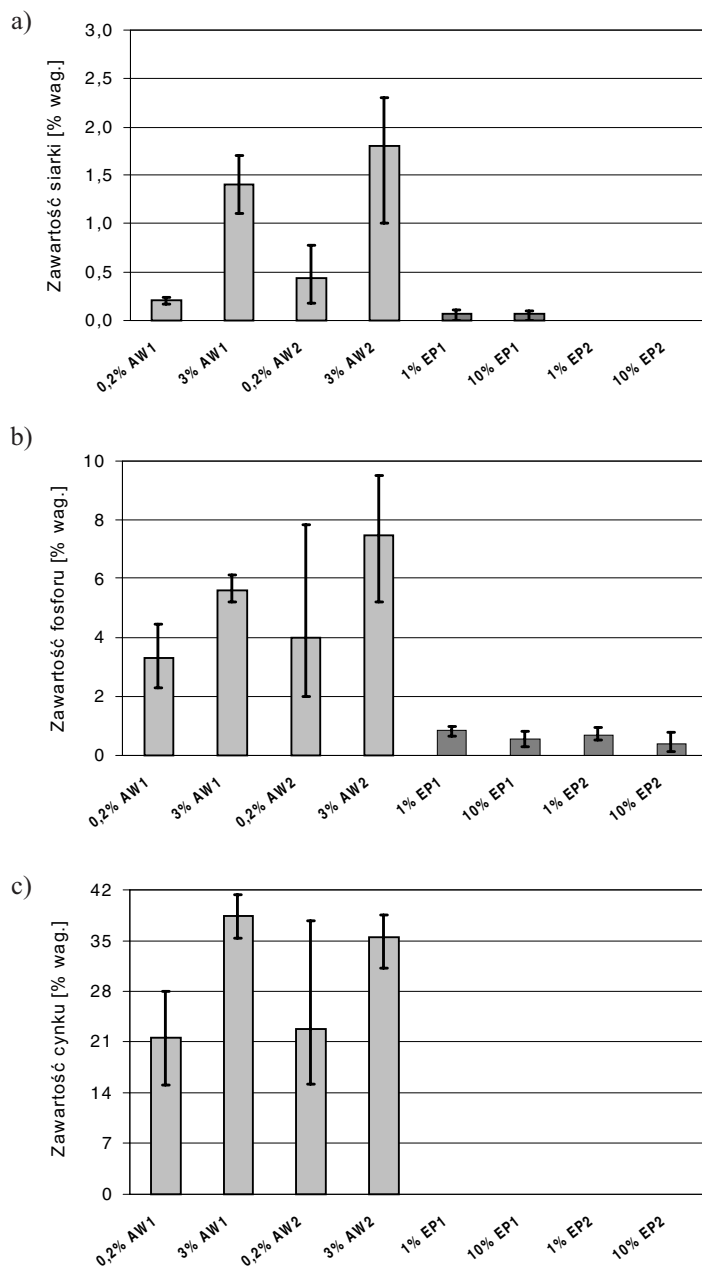
Rys. 3. Zawartość poszczególnych pierwiastków w warstwie wierzchniej śladu zużycia po badaniu w warunkach przeciwwżyciowych: a) siarka, b) fosfor, c) cynk

Fig. 3. The concentration of particular elements in the surface layer of the wear scar after testing in the AW regime: a) sulfur, b) phosphorus, c) zinc



Rys. 4. Zawartość poszczególnych pierwiastków w warstwie wierzchniej śladu zużycia po badaniu w warunkach przeciwwzartarciowych: a) siarka, b) fosfor, c) cynk

Fig. 4. The concentration of particular elements in the surface layer of the wear scar after testing in the EP regime: a) sulfur, b) phosphorus, c) zinc



Rys. 5. Zawartość poszczególnych pierwiastków w warstwie wierzchniej ścieżki zużycia po badaniu pitingu: a) siarka, b) fosfor, c) cynk

Fig. 5. The concentration of particular elements in the surface layer of the wear track after testing the fatigue life: a) sulfur, b) phosphorus, c) zinc

Duża skuteczność działania dodatków AW w warunkach przeciwzużyciowych, objawiająca się wysokimi wartościami wskaźnika G_{oz40} , wynika ze stosunkowo niskiej temperatury rozkładu termicznego dialkildiofosforanu cynku (ZDDP), wynoszącej 200–300°C [L. 26]. Wymuszenia w węzle tarcia są w warunkach przeciwzużyciowych wystarczające do tego, żeby cząsteczka ZDDP uległa częściowej destrukcji (zrywane są wewnętrzne wiązania), co umożliwia wbudowanie się atomów np. S, P czy Zn w strukturę warstwy wierzchniej. Skutkuje to znaczną modyfikacją składu pierwiastkowego powierzchni śladu zużycia dla dodatków AW (Rys. 3), znacznie większą niż w przypadku dodatków EP, dla których temperatura rozkładu termicznego jest znacznie wyższa i sięga 400–500°C [L. 27].

Dodatki EP, mając wysoką temperaturę rozkładu termicznego, ujawniają swoją skuteczność dopiero w warunkach przeciwzatarciowych – wskaźnik p_{oz} jest dla nich znacznie wyższy niż dla dodatków AW. W tych warunkach, gdzie wymuszenia są bardzo wysokie (najwyższa JMT – Tab. 1), dodatki EP w znacznie większym stopniu modyfikują powierzchnię śladu tarcia (Rys. 4) niż AW. Szczególnie istotna jest modyfikacja powierzchni siarką, bez porównania większa dla dodatków EP niż AW. Co prawda uwagę zwraca wysoki wskaźnik p_{oz} dla pakietu 3% AW2, wyższy niż dla 1% EP2 (Rys. 2 b), choć jest on znacznie mniejszy niż dla pozostałych olejów z dodatkami EP. Wynika to prawdopodobnie ze znaczącej modyfikacji powierzchni śladu zużycia fosforem, w postaci fosforanów [L. 28], bez porównania większej niż dla pozostałych olejów z dodatkami AW (Rys. 4). I odwrotnie – dla 10% EP1, pomimo znacznej obecności P w powierzchni śladu zużycia, p_{oz} jest znacznie mniejszy niż dla 10% EP2 (Rys. 2 b). Toteż obecność siarki w warstwie wierzchniej, w postaci FeS [L. 29], wydaje się być najważniejsza dla zapewnienia dobrych właściwości przeciwzatarciowych węzła tarcia, na co wskazują także liczne doniesienia literaturowe [L. 1, 29, 30].

Oprócz modyfikacji powierzchni śladu zużycia siarką bardzo istotną dla zachowania dobrych właściwości przeciwzatarciowych jest równomierność jej rozkładu powierzchniowego. Przykładem jest tu olej z 10% zawartością EP1 i olej z 10% EP2. Średnia zawartość siarki w warstwie wierzchniej jest dla nich podobna (Rys. 4 a). Jednak jej rozkład powierzchniowy jest nieporównanie bardziej równomierny dla 10% EP2 niż 10% EP1, o czym świadczy rozrzut wyników. Stąd wskaźnik p_{oz} jest dla pierwszego oleju znacznie wyższy (Rys. 2 b).

Znaczenie modyfikacji powierzchni związkami siarki czy fosforu dla przeciwdziałania zużyciu i zacieraniu w czasie tarcia ślizgowego jest powszechnie znane. Wynika ona z adsorpcji fizycznej, chemicznej, a następnie reakcji chemicznych aktywnych dodatków smarowościowych z powierzchnią tarcia. Można w skrócie powiedzieć, że związki S i P przeciwdziałają powstawaniu szczytów adhezyjnych, bądź ułatwiają ich zrywanie. Wiele danych na ten temat można znaleźć w literaturze, np. [L. 1, 31, 32]. Mniej poznana jest natomiast rola Zn. Przypuszczalnie pierwiastek ten, wbudowany – na skutek dyfuzji [L. 33] – w dużej ilości w powierzchnię stali, pozwala na elektrochemiczne przeciwdziałanie procesom korozyjnym [L. 34].

Warto tu odnotować, że podobne wyniki odnośnie działania dodatków AW i EP odnotowano w eksploatacyjnych badaniach samochodu osobowego [L. 35]. Olej przekładniowy klasy jakościowej API GL-3, w którego składzie znajduje się pakiet dodatków AW, pozwalał w umiarkowanych warunkach eksploatacji uzyskać mniejsze zużycie przekładni zębatych skrzyni biegów niż olej wysokiej klasy API GL-5 z dodatkami EP.

W najbardziej łagodnych warunkach tarcia (badanie pittingu w ruchu tocznym) wymuszenia są znacznie niższe niż dla warunków przeciwzuzyciowych (JMT 6-krotnie niższa – **Tab. 1**) i warunków przeciwtarciovych (JMT 35-krotnie niższa). Dodatki AW przy niskich wymuszeniach bez porównania lepiej modyfikują warstwę wierzchnią śladu zużycia niż EP (**Rys. 5**). Szczególnie wysoka jest tu zawartość P i Zn. Decyduje o tym znacznie łatwiejszy rozkład termiczny cząsteczki ZDDP niż związków S-P. Dlatego dodatki AW, szczególnie gdy są dodane w niewielkich ilościach (np. 0,2%) znacząco polepszają trwałość zmęczeniową (L_{10}), w przeciwieństwie do dodatków EP (**Rys. 2 c**), które dodane w małych ilościach (1%) nie mają wpływu na L_{10} . Dodać tu należy, że podobne wyniki uzyskali autorzy pracy [L. 36] w badaniach zmęczeniowych za pomocą stanowiska przekładniowego.

W literaturze najczęściej wymienianym mechanizmem zwiększania trwałości zmęczeniowej jest uplastycznienie powierzchni poprzez jej modyfikację siarką, fosforem i cynkiem, w wyniku oddziaływania dodatków AW. W ten sposób następuje znaczna redukcja naprężeń (smarowanie EHD) wynikająca z oddziaływania „spłaszczonych” nierówności powierzchni i w efekcie wzrost trwałości zmęczeniowej [L. 14]. Z drugiej jednak strony dodatki AW redukują zużycie, co z kolei utrzymuje naciski

na wysokim poziomie i może przyczynić się do spadku trwałości zmęczeniowej [L. 12, 37]. Wydaje się, że można tym wytłumaczyć spadek trwałości zmęczeniowej przy zwiększaniu zawartości dodatków AW w oleju, widoczny szczególnie dla dodatku AW1 (Rys. 2 c).

O ile dodatki AW mają raczej pozytywny wpływ na trwałość zmęczeniową, o tyle dodatki EP wywierają wpływ negatywny, szczególnie gdy dodane są do oleju w większych ilościach (np. 10%) – Rys. 2 c). W przypadku tych ostatnich najczęściej obecnie wymienianym mechanizmem redukcji trwałości zmęczeniowej jest ich agresywność korozyjna. Powoduje ona powstanie na smarowanej powierzchni mikrowgłębień, będących potencjalnymi „załążkami” wykruszeń zmęczeniowych, co z kolei zwiększa prawdopodobieństwo wystąpienia pittingu [L. 12]. Innym mechanizmem odpowiedzialnym za redukcję trwałości zmęczeniowej jest sorpcja aktywnych dodatków smarnościowych w mikropęknięciach, co powoduje zmniejszenie ich energii powierzchniowej i spójności materiału, a to z kolei ułatwia propagację pęknięć zmęczeniowych [L. 24].

Pozostając przy dodatkach EP, podkreślić trzeba, że mogą one mieć także pozytywny wpływ na trwałość zmęczeniową [L. 13]. Według niektórych autorów dzieje się tak wtedy, gdy stosunek zastępczej chropowatości powierzchni współpracujących ciał do grubości filmu smarowego jest wyższy niż 1,5 [L. 38]. Niebagatelną rolę przy porównywaniu wyników badań zmęczeniowych odgrywają zatem warunki badań.

WNIOSKI

Dodatki AW polepszają nie tylko właściwości przeciwzużyciowe smarowanego nimi wężła tarcia, ale dodatkowo – dodane w niewielkiej ilości (np. 0,2%) – wpływają korzystnie na trwałość zmęczeniową. Zwiększenie stężenia tych dodatków w oleju bazowym pozwala znacząco poprawić właściwości przeciwzużyciowe, ma jednak niekorzystny wpływ na trwałość zmęczeniową.

Dodatki EP, dodane nawet w niewielkim stężeniu (np. 1%) do oleju bazowego, powodują kilkukrotną poprawę właściwości przeciwzatarciowych oraz, w znacznie mniejszym stopniu, przeciwzużyciowych, praktycznie nie wpływając przy tym jednak na trwałość zmęczeniową. Zwiększenie stężenia tych dodatków skutkuje polepszeniem właściwości przeciwzatarciowych, jak też przeciwzużyciowych. Towarzyszy temu jednak znaczny spadek trwałości zmęczeniowej.

Uzyskane wyniki są efektem modyfikacji warstwy wierzchniej śladu zużycia pierwiastkami pochodzącymi z dodatków smarowościowych, np. siarką, fosforem i cynkiem.

LITERATURA

1. Stachowiak G.W., Batchelor A.W.: Engineering tribology. Elsevier. 1993, Amsterdam.
2. Nosal S.: Tribologiczne aspekty zacierania się węzłów ślizgowych. Wyd. Politechniki Poznańskiej. 1998, Poznań.
3. Praca zbiorowa (red. Neale M.J.): Tribology handbook. Newness–Butterworths. 1973, Londyn.
4. Pytko S.: Badania mechanizmu niszczenia powierzchni tocznych elementów maszynowych. Zeszyty Naukowe AGH – Elektryfikacja i Mechanizacja Górnictwa i Hutnictwa, z. 25, 1967.
5. Pytko S., Szczerek M.: Pitting – forma niszczenia elementów tocznych. Tribologia, nr 4/5, 1993, s. 317–334.
6. Lawrowski Z.: Tribologia. Tarcie, zużywanie i smarowanie. PWN. 1993, Warszawa.
7. Kajdas C.: Podstawy zasilania paliwem i smarowania samochodów. WKŁ. 1983, Warszawa.
8. Zwierzycki W.: Oleje smarowe. RN Glimar – ITeE. 1996, Gorlice–Radom.
9. Pytko S.: Podstawy tribologii i techniki smarowniczej. Wyd. AGH. 1989, Kraków.
10. Tuszyński W.: Badanie przeciwzużyciowych oddziaływań środków smarowych (rozprawa doktorska). Wojskowy Instytut Techniki Panczernej i Samochodowej. 1999, Sulejówek.
11. Szczerek M., Tuszyński W.: Badania tribologiczne. Zacieranie. Wyd. ITeE. 2000, Radom.
12. Torrance A.A., Morgan J.E., Wan G.T.Y.: An additive's influence on the pitting and wear of ball bearing steel. Wear, t. 192, 1996, s. 66–73.
13. Kolář D., Libera M., Waligóra W.: Ocena wpływu dodatku smarowościowego (EP) do oleju przekładniowego na powierzchniową trwałość zmęczeniową elementów maszyn. Tribologia, nr 3, 2000, s. 391–398.
14. Wang Y., Fernandez J.E., Cuervo D.G.: Rolling–contact fatigue lives of steel AISI 52100 balls with eight mineral and synthetic lubricants. Wear, t. 196, 1996, s. 110–119.
15. Szczerek M.: Metodologiczne problemy systematyzacji eksperymentalnych badań tribologicznych. Wyd. ITeE. 1997, Radom.
16. PN–76/C–04147. Badanie własności smarnych olejów i smarów.
17. WTWT–94/MPS–025. Olej przekładniowo–hydrauliczny OPH.

18. Piekoszewski W., Szczerek M., Tuszyński W.: The action of lubricants under extreme pressure conditions in a modified four-ball tester. *Wear*, t. 249, 2001, s. 188–193.
19. Szczerek M., Tuszyński W.: A method for testing lubricants under conditions of scuffing. Part I. Presentation of the method. *Tribotest*, t. 8, nr 4, 2002, s. 273–284.
20. IP 300/82. Rolling contact fatigue tests for fluids in a modified four-ball machine.
21. Cann P., Spikes H.A., Cameron A.: Thick film formation by zinc dialkyldithiophosphates. *ASLE Trans*, t. 26, 1983, s. 48–52.
22. Boruta J., Wachal A.: Analiza warunków pracy olejów przy tarciu ślizgowym. *Technika smarownicza – Trybologia*, nr 3, 1978, s. 77–82.
23. Alliston–Greiner A.F.: Test methods in tribology. *Materiały 1 Światowego Kongresu Tribologicznego w Londynie*, 1997, s. 85–93.
24. Hebda M., Wachal A.: *Trybologia*. WNT. 1980, Warszawa.
25. Pytko S., Szczerek M., Tuszyński W.: Ocena metod badań wykonywanych za pomocą aparatu czterokulowego. *Trybologia*, nr 4, 2001, s. 711–724.
26. Kawamura M.: The correlation of antiwear properties with the chemical reactivity of zinc dialkyldithiophosphates. *Wear*, t. 77, 1982, s. 287–294.
27. Wachal A., Kulczycki A.: Derywatograficzne badania sorpcji dodatków siarkowych na powierzchni żelaza. *Trybologia*, nr 1, 1988, s. 15–18.
28. Johansson E., Hogmark S., Redelius P.: Surface analysis of lubricated sliding metal contacts. Part II. *Tribologia (periodyk fiński)*, t. 16, 1997, s. 26–38.
29. Forbes E.S.: The load carrying action of organo-sulphur compounds – a review. *Wear*, t. 15, 1970, s. 87–96.
30. Senatorski J., Wachal A.: Wpływ dodatków siarkowych i fosforowo-siarkowych w oleju smarowym na zużycie stali w styku niekonforemnym. *Tribologia*, nr 1, 1991, s. 7–11.
31. Godfrey D.: Boundary Lubrication. *Materiały sympozjum „Interdisciplinarny approach to friction and wear” w San Antonio*, 1967, s. 335–384.
32. Coy R.C., Quinn T.F.J.: The use of physical methods of analysis to identify surface layers formed by organosulphur compounds in wear tests. *ASLE Trans.*, t. 18, 1975, s. 163–174.
33. Meyer K., Kajdas C.: Bedeutung des Metallaustausches für Grenzflächenreaktionen von Metaldithiophosphaten. *Trib.+Schm*, t. 2, 1989, s. 71–76.
34. Tuszyński W., Molenda J., Makowska M.: Tribochemical conversions of zinc dialkyldithiophosphate (ZDDP) under extremely different pressure conditions. *Tribology Letters*, t. 13, nr 2, 2002, s. 103–109.
35. Kulczycki A.: Ocena działania dodatków smarnościowych w olejach przekładniowych. *Wyd. Politechniki Poznańskiej*. 1997, Poznań.
36. Townsend D.P., Zaretsky E.V., Scibbe H.W.: Lubricant and additive effects on spur gear fatigue life. *Journal of Synth. Lubr.*, t. 6, nr 2, 1989, s. 83–106.

37. Rowe C.N., Armstrong E.L.: Lubricant effects in rolling–contact fatigue. *Lubrication Engineering*, t. 38, 1989, s. 23–30 i 39–40.
38. Philips M.R, Quinn T.F.J.: The effect of surface roughness and lubricant film thickness on the contact fatigue life of steel surfaces lubricated with a sulfur–phosphorus type of extreme pressure additive. *Wear*, t. 51, 1978, s. 11–24.

Recenzent:
Janusz JANECKI

Summary

The authors present results of testing of lubricating oils of various chemical composition. A mineral base oil was blended with commercial lubricating additives of different type and concentration. Two different AW (antiwear) additives and EP (extreme–pressure) ones were used. The AW additives contained ZDDP, and EP ones – organic S–P compounds. The additives are typical of automotive gear oils.

The tribological tests were performed in two different four–ball testers. The first one (denoted T–02) was used to determine AW/EP properties at sliding friction. The second instrument (T–03) was used to assess the fatigue (pitting) life at rolling movement. Both the testers were designed and are manufactured by ITeE.

The results indicate that AW additives not only improve AW properties (as expected) but are also beneficial for the fatigue life, particularly at small concentrations. An increase of the concentration of such additives leads to an improvement of AW properties but has a disadvantageous effect on the fatigue life.

EP additives – even at a small concentration – significantly improve EP properties, and slightly AW properties, but without any influence on the fatigue life. An increase of the concentration of such additives leads to a further improvement of EP and AW properties. However, this is accompanied by a much decrease of the fatigue life. By using SEM and EDS for analysis of the worn surface, the authors were enabled to identify mechanisms of action of various lubricating additives under different friction conditions.

Tomasz ROCHATKA*, Wiesław ZWIERZYCKI¹

ROZWINIĘCIA IDEI M.M. CHRUSČOVA WERSJA WSPÓŁCZESNA

THE CONTEMPORARY VERSION OF THE CONTINUATION OF KRUSHCHEV'S CONCEPT

Słowa kluczowe:

zużycie, badania, charakterystyki zużyciowe

Key words:

wear, testing, characteristics

Streszczenie

W przedstawionych w artykule badaniach autorzy wykorzystali koncepcję M.M. Chruščova wyznaczania liniowej intensywności zużywania I_h w układach modelowych pracujących pod stałym obciążeniem, w których w wyniku zużycia maleją naprężenia stykowe. Opracowano model matematyczny wiążący pionowe zbliżenie próbek w aparacie czterokulowym wyposażonym w węzeł 3 wałeczki – stożek z wymiarem śladu zużycia wałeczków.

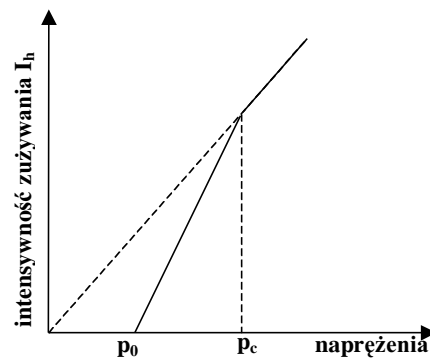
¹ Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych Politechniki Poznańskiej
ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań

Model zweryfikowano w specjalnym eksperymencie uzyskując bardzo dobrą zbieżność wyników obliczeń i eksperymentu.

WPROWADZENIE

W artykule opublikowanym w roku 1990 I.A. Bujanovski [L. 1] przypomniał badania M.M. Chruščova [L. 2], w których o odporności na zużywanie materiałów wnioskowano na podstawie rozmiaru śladu zużycia próbki płaskiej za pomocą obracającego się wału lub tarczy, przy stałym obciążeniu. Wyniki swych badań M.M. Chruščov przedstawił w postaci zależności liniowej intensywności zużywania I_h (zużycie liniowe h odniesione do drogi tarcia s) od malejących naprężeń stykowych p (Rys.1). Na charakterystyce z Rys. 1. można wyróżnić trzy zakresy:

- w pierwszym naprężenia stykowe maleją od naprężenia hertzowskiego p_H do wartości p_c – w tym okresie następuje docieranie współpracujących elementów (tarcie graniczne),
- w drugim obszarze współpracy (zmiana naprężenia od wartości p_c do p_0) zwiększa się dalej powierzchnia styku i liniowo maleje intensywność zużywania I_h , tarcie ma charakter mieszany (półpłynny) a zużywanie przebiega w sposób ustabilizowany;
- po osiągnięciu w teście zużyciowym naprężeń stykowych po zużywanie praktycznie nie jest zauważalne, w przypadku smarowania elementów olejem można sądzić, że zachodzi tarcie płynne, w przypadku zaś stosowania smarów z aktywnymi powierzchniowo substancjami można się „doszukiwać” efektu mechano - chemicznego (równowaga zużywania i odbudowy warstewek powierzchniowych).



Rys. 1. Intensywność zużywania I_h w funkcji naprężeń stykowych [L. 1]

Fig. 1. Wear rate I_h versus normal contact stress p [L. 1]

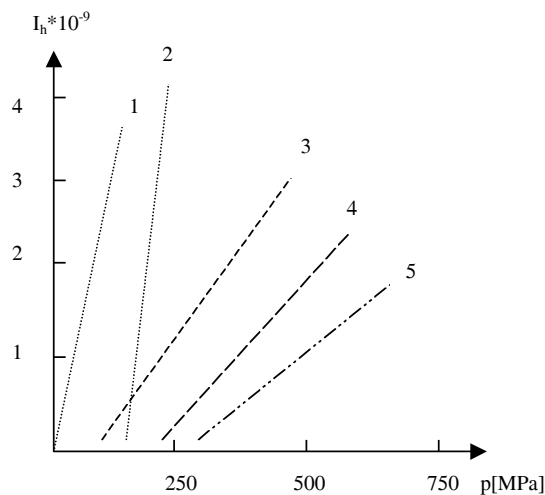
Scharakteryzowaną wyżej ideę M.M. Chruščova zastosował I.A. Bujanovski [L. 1] do badania dodatków przeciwzużyciowych i przeciwzatarciowych na aparacie czterokulowym w różnych kompozycjach olejowych. Testy zużyciowe prowadzone były w próbach piętnastominutowych, po których mierzono średnice śladów wytarcia kulek d , a zużycie liniowe h określono z równania Fenga [L. 3].

$$h = (39,4d^2 - 2,732 \cdot 10^{-3}N/d) \cdot 10^{-9} \quad (1)$$

w którym uwzględniono efekt sprężystego i odkształcenia (N – siła osiowa obciążająca układ tarcia). W eksperymencie stosowano typowe kulki ze stali ŁH15 o średnicy 12,7 mm. Po każdym piętnastu minutach próbę przerywano, mierząc średnicę śladu zużycia d wykorzystywaną do obliczenia h oraz p . Liniową intensywność zużywania obliczano z zależności

$$I_h = \frac{dh}{dS} \approx \frac{h_1 - h_2}{S_1 - S_2} = \frac{\Delta h}{\Delta S} \quad (2)$$

Rezultaty badań I.A. Bujanovskiego potwierdzające słuszność idei M.M. Chruščova pokazano na **Rys. 2**.



Rys. 2. Intensywność zużywania stali ŁH15 w funkcji naprężeń stykowych (1–5 różne środki smarowe) [L. 1]

Fig. 2. Wear rate of ŁH15 steel versus normal contact stress (1–5 different lubricants) [L. 1]

DALSZY ROZWÓJ PODEJŚCIA

Autorzy tego artykułu wykorzystali scharakteryzowane wcześniej podejścia do rozwiązywania własnego problemu badawczego, jakim był racjonalny dobór materiałów konstrukcyjnych współpracujących tarciovo w środowiskach technologicznych przemysłu spożywczego. Dyrektywy UE w związku z koniecznością zapewnienia wysokiego poziomu higieny przy produkcji dopuszczają do styku z żywnością w grupie materiałów metalicznych jedynie:

- stale odporne na korozję,
- aluminium anodowane oraz
- powłoki cynowe (blachy na puszki do konserw).

Zabronione jest obecnie stosowanie stopów miedzi.

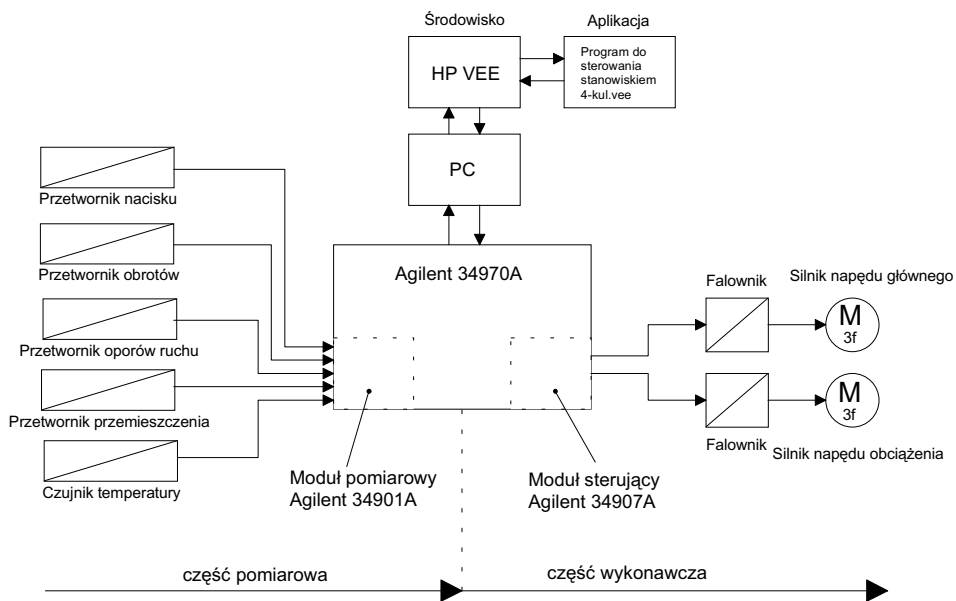
Znana powszechnie jest opinia, że stale odporne na korozję, a więc stale chromowe i chromowo-niklowe cechują się znacznie gorszymi własnościami tribotechnicznymi niż stale węglowe, jednak dane o tych własnościach są nieliczne i w związku z tym nie można ich wykorzystać przy projektowaniu elementów (i powierzchni) roboczych maszyn technologicznych dla przemysłu spożywczego. Istniała zatem konieczność opracowania metody pozwalającej uzyskiwać charakterystyki zużyciowe przydatne w projektowaniu, dla rzeczywistych materiałów konstrukcyjnych współpracujących tarciovo w rzeczywistych środowiskach technologicznych.

Poszukując rozwiązania tego problemu [L. 7] przyjęto, że tworzenie baz danych jest wtedy racjonalne, gdy testy zużyciowe prowadzone będą na urządzeniu szeroko rozpowszechnionym w laboratoriach badawczych. Metoda musi pozwalać również na wyznaczenie liniowej intensywności zużywania I_h w funkcji naprężeń stykowych p . Taka bowiem charakterystyka, uniwersalna pozwala dokonywać obliczeń trwałości (niezawodności) przy pomocy wcześniej opracowanych programów komputerowych [L. 9, 10]. Działania autorów zmierzające do rozwiązania postawionego problemu przebiegały następująco [L. 7]:

1. Analiza innych prac związanych z wyznaczaniem liniowej intensywności zużywania I_h na aparacie czterokulowym [L. 4–6], przyniosła przekonanie, że konieczne jest wyposażenie tribometru w układ mierzący precyzyjnie zbliżenie próbek w wyniku zużycia. A. Bos [L. 4] wyprowadził uproszczoną zależność funkcyjną wiążącą mierzone zbliżenie pionowe ze średnicą skaz kulek dolnych. Dokładniejsze rozwiązania są autorstwa G.A. Strunksa, D.K. Totha, C.S. Saby [L. 5, 6]

2. Zdecydowano się na wybór aparatu czterokulowego ze skojarzeniem trzy wałeczki – stożek, taki układ jest znacznie wygodniejszy (tańszy) w przypadku konieczności odwzorowywania w badaniach triady materiałowej: „materiał elementu 1 – środowisko – materiał elementu 2”.
3. Tribometr wyprodukowany w Instytucie Technologii Eksploatacji poddano gruntownej modernizacji obejmującej:
 - a) zmiany w układach wykonawczych,
 - b) opracowanie systemu automatycznego sterowania częścią wykonawczą i pomiarową,
 - c) realizację układu mierzącego pionowe zbliżenie próbek.

W rezultacie uzyskano urządzenie pozwalające na ciągłą regulację obciążeń i prędkości ślizgania oraz gradientów zmian tych. Schemat układów i wzajemne powiązania między ich elementami pokazano na **Rys. 3**.



Rys. 3. Schemat powiązań między układami tribometru [L. 7]

Fig. 3. The scheme of the connections between blocks of tribometer [L. 7]

4. Opracowano zależność funkcyjną wiążącą pionowe zbliżenie w układzie „3w-s” z wymiarem śladu zużycia wałeczków. Punktem wyjścia do uzyskania własnego rozwiązania były przesłanki wynikające z pracy G.A. Strunksa, D.K. Totha, C.S. Saby (rozwiązane dla układu czterech kulek [L. 5]):

- pionowe przemieszczenie współpracujących elementów zależne jest od szerokości skazy zużycia zmierzonej w kierunku prostopadłym do kierunku ruchu,
 - długość skazy (zmierzona w kierunku równoległym do kierunku ruchu) determinowana jest kształtem skazy (promieniem krzywizny) w przekroju prostopadłym; wspomniany promień krzywizny skazy zależy od wartości zużycia ruchomego elementu,
 - przekrój skazy w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku ruchu ma kształt kołowy.
5. Zaproponowany w pracy [L. 5] model można zastosować, gdy udział zużycia w pionowym przemieszczeniu kulek znacznie przewyższa układ odkształceń sprężystych.

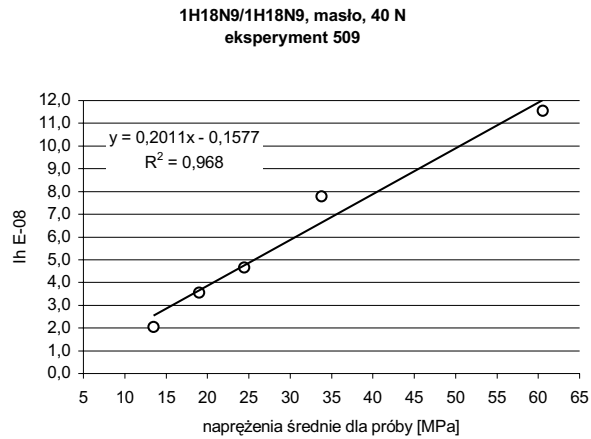
Przeprowadzono specjalnie zaplanowany eksperyment weryfikujący opracowany model autorski dla skojarzeń ze stali 45, 1H18N9 i H17 w oleju uniwersalnym bez dodatków oraz w przykładowych środowiskach spożywczych jak masło i margaryna [L. 7]. Przykładowe wyniki badań jednoimiennego skojarzenia ze stali 1H18N9 w maśle jako środowisku technologicznym przedstawiono w **Tab. 1** oraz na **Rys. 4 i 5**. Widać zadowalającą (bardzo dobrą) zbieżność między wynikami pomiarów oraz obliczeń

Tabela 1. Wyniki testów dla skojarzeń 1H18N9/1H18N9 w maśle [L. 7]

Teb. 1. The results of the test for 1H18N9/1H18N9 in the butter as lubricant [L. 7]

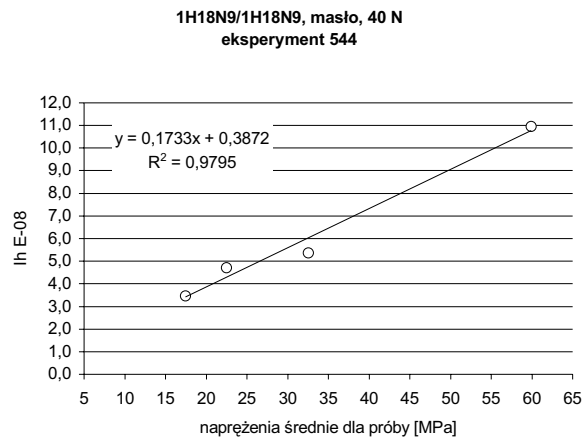
Lp	przedział czasu	zmiana rezystancji	średnice skaz		naprężenia	intensyw. zużycia E-08	WARUNKI BADAŃ		
			pomiar	obliczenia			temp. środka smarowego	moment tarcia	siła osiowa
	[s]	[Ω]	[mm]	[mm]	[MPa]	[-]	[°C]	[Nm]	[N]
badanie 509									
1	1080	13,58	0,90 / 0,67	0,90 / 0,65	–	–	40,15	0,0362	24,24
2	590	25,96	1,20 / 0,90	1,20 / 0,90	60,54	11,55	35,95	0,0242	23,76
3	780	36,58	1,43 / 1,07	1,41 / 1,07	33,79	7,8	37,15	0,0233	23,82
4	1400	53,46	1,63 / 1,30	1,61 / 1,29	24,41	4,66	36,53	0,0292	24
5	720	60,02	1,67 / 1,37	1,69 / 1,37	18,98	3,55	35,32	0,0249	24,03
6	6075	88,16	1,93 / 1,60	2,00 / 1,66	13,49	2,06	28,57	0,0255	24,97
badanie 544									
1	870	13,12	0,90 / 0,67	0,88 / 0,64	–	–	38,59	0,0255	26,05
2	630	25,56	1,20 / 0,90	1,19 / 0,90	59,93	10,96	36,23	0,0215	25,84
3	1300	37,62	1,43 / 1,07	1,43 / 1,09	32,58	5,36	35,49	0,0177	25,76
4	1400	54,76	1,63 / 1,30	1,63 / 1,31	22,51	4,72	34,64	0,0197	26,22
5	1100	63,74	1,67 / 1,37	1,74 / 1,41	17,43	3,46	33,27	0,0175	26,37

średnic skaz zużycia (**Tab. 1** – czwarta i piąta kolumna) oraz liniowy charakter zależności intensywności zużywania I_h od naprężeń stykowych (**Rys. 4 i 5**).



Rys. 4. Intensywność zużywania I_h w funkcji naprężeń stykowych p (eksperyment 509, czas – 3h) [L. 7]

Fig. 4. Wear rate I_h versus normal contact stress p (test number 509, time of test – 3h) [L. 7]



Rys. 5. Intensywność zużywania I_h w funkcji naprężeń stykowych p (eksperyment 503, czas – 1,5h) [L. 7]

Fig. 5. Wear rate I_h versus normal contact stress p (test number 503, time of test - 1,5h) [L. 7]

PODSUMOWANIE

Przedstawiony w artykule fragment wyników badań wskazuje na możliwości nowo opracowanej metody. Wariant, w którym w aparacie czterokulowym wykorzystuje się węzeł tarcia 3 wałeczki – stożek pozwala w sposób względnie tani, odwzorować rzeczywisty styk tarciowy materiałów konstrukcyjnych w środowiskach ciekłych i mazistych. Opracowana metoda ma charakter uniwersalny, lecz szczególnie przydatna jest w przypadku badań w środowiskach przemysłu spożywczego, które cechuje tak duża złożoność, że nie jest celowe zastępowanie ich środowiskami modelowymi (uproszczonymi). Metoda jest szybka (bezdemontażowa), obliczenia wykonuje na bieżąco program komputerowy sterujący procesem badawczym, dlatego celowe jest jej stosowanie nie tylko do tworzenia baz danych, lecz również do optymalnego doboru materiałów w konkretnym przypadku projektowym. Opracowany system pomiarowy jest kompatybilny z opracowanym wcześniej systemem komputerowym umożliwiającym wszechstronną analizę trwałościowo-niezawodnościową węzłów podlegających zużyciu [L. 8–10].

LITERATURA

1. N.A. Вujanовский, Развитие идеи М.М. Хрущова о триботехнических испытаниях материалов, *Trenie i Iznos*, 1990, nr 6, s. 1124–1132.
2. Жрущов М.М.: Исследования прибором силавов и цанф М.Л. 1946.
3. Feng I. Ming, A new approach in interpreting the four-ball wear results. *Wear*, vol. 5, 1962, s. 275–288.
4. Bos A., Wear in the four-ball apparatus: relationship between the displacement of the upper ball nad the diameter of the wear scars on the lower balls. *Wear*, vol. 41, 1977, s. 191–194.
5. Strunks G.A., Toth D.K., Saba C.S., Geometry of wear in the sliding four-ball wear test. *Tribology Transactions*, vol. 35, 1992, s. 715–723.
6. Wright M.S., Jain V.K., Saba C.S., Wear rate calculation in the four-ball wear test. *Wear*, vol. 134, 1989, s. 321–324.
7. Rochatka T. Tribotechniczna ocena stali odpornych na korozję. Rozprawa doktorska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej (maszynopis – przewód w toku), Poznań 2003.
8. Stachowiak A. Rozprawa doktorska nt. „Kształtowanie niezawodności kinematycznych węzłów maszyn podlegających zużyciu korozyjno-mechanicznym”, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej Poznań 2002.

9. Fizyczne podstawy doboru materiałów na elementy maszyn współpracujące tarcioowo. Pod. red. W. Zwierzyckiego i M. Grądkowskiego. Wyd. ITeE, Radom–Poznań, 2001.
10. Modele prognostyczne korozyjno-mechanicznego zużywania się elementów maszyn. Pod. red. W. Zwierzyckiego. Wyd. ITeE, Poznań–Radom 2002.

Recenzent:
Jan BURCAN

Summary

The authors of this paper have elaborated the new method of measuring the value of the wear rate I_h as the function of the normal contact stress p . In order to achieve this aim a four-ball apparatus with the system „three rollers – cone” was used. A new solution adopts the old M.M. Krushchev’s concept connected with the wear test, in which normal contact stress p is decreasing during the test time (the normal force is constant). The results of experiments verifying elaborated model are presented as well.

Elżbieta ROGOSĆ*

WPLYW UZDATNIANIA NA WŁAŚCIWOŚCI TRIBOLOGICZNE OLEJÓW SPRĘŻARKOWYCH

AN INFLUENCE OF TREATMENT OF COMPRESSOR OILS ON THEIR TRIBOLOGICAL PROPERTIES

Słowa kluczowe

oleje sprężarkowe, eksploatacja, uzdatnianie, właściwości przeciwzużyciowe, właściwości przeciwzatarciowe

Key-words

compressor oils, exploitation, treatment, antiwear properties, antiseizure properties

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu opracowanej metody uzdatniania na właściwości tribologiczne olejów sprężarkowych. Oceniano zmianę właściwości przeciw-zatarciowych i przeciwzużyciowych w warunkach zacierania olejów poddawanych kolejno procesowi sedymentacji, działania sił odśrodkowych, adsorpcji za pomocą adsorberów stałych

* Instytut Technologii Eksploatacji (ITeE), Zakład Tribologii, ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, tel. (0-48) 36-442-41.

oraz filtracji przegrodowej. Badania właściwości smarnych realizowano za pomocą testera T-02 oraz T-05.

W wyniku przeprowadzonych badań wykazano, że wszystkie zastosowane operacje jednostkowe będące składowymi procesu uzdatniania zapewniają poprawę właściwości smarnych oleju sprężarkowego, jednak nie wszystkie w jednakowym stopniu. Wykazano konieczność łączenia pojedynczych procesów w sekwencje zapewniające poprawę właściwości smarnych uzdatnianego oleju w takim stopniu, aby było możliwe osiągnięcie poziomu charakterystycznego dla oleju świeżego. Korzystny wpływ uzdatniania na właściwości smarne oleju potwierdzono badaniami przeprowadzonymi za pomocą testera T-05 w skojarzeniu o styku liniowym skoncentrowanym i rozłożonym.

WPROWADZENIE

Istotną rolę w eksploatacji urządzeń technicznych odgrywają środki smarowe. Są one nieodłącznym elementem składowym maszyn i urządzeń tworzącym wraz z materiałami pochodzącymi z atmosfery bezpośrednie otoczenie pary trącej [L. 1, 2]. Jak każdy inny element konstrukcyjny, oleje smarowe mają do spełnienia określone funkcje techniczne [L. 3]. Wprowadzane w strefę tarcia celem utworzenia warstewki granicznej pomiędzy parami trącymi zmniejszają opory tarcia i zużycie tribologiczne. Ponadto odprowadzają ciepło tarcia, produkty zużycia, zabezpieczają powierzchnię przed korozją oraz uszczelniają układ smarowy [L. 4].

Jakość procesów smarowania determinowana jest przez cechy węzłów tarcia i cechy substancji tworzącej warstwę smarującą [L. 5, 6]. W zależności od rodzaju i przeznaczenia substancje smarowe posiadają różne cechy. Podczas eksploatacji - wskutek oddziaływań urządzeń technicznych, środowiska, warunków i sposobu eksploatacji - następuje zmiana tych cech. Dominującą rolę destrukcyjną podczas eksploatacji środków smarowych odgrywają procesy termicznego utleniania wobec katalizatorów oraz zanieczyszczania. Prowadzą one do zmian składu chemicznego środków smarowych, ich właściwości reologicznych, smarnych, fizykochemicznych [L. 7÷9].

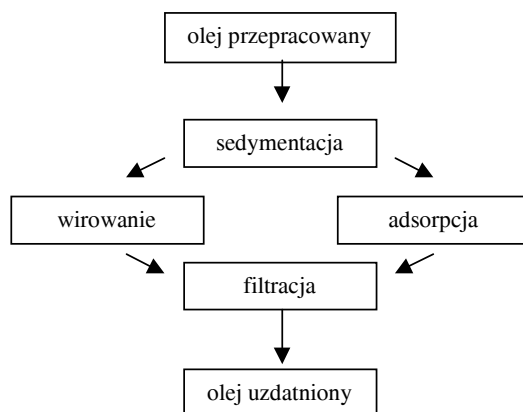
Skutki tribologiczne zachodzących w środkach smarowych zmian stazeniowych zależą od charakteru wymuszeń, rodzaju stosowanego środka smarowego i urządzenia, w którym pracuje [L. 8, 10]. Najczęściej jest to skałe smarowanie, zatykanie przewodów olejowych, niewystarczająca

wymiana ciepła, zwiększenie tarcia i zużycia. Może nastąpić wzrost oporów tarcia i utrudnienie dopływu oleju do smarowanych węzłów tarcia. Podczas zachodzących procesów utleniania olejów smarowych powstają aktywne związki o charakterze polarnym, które oddziałując na powierzchnię metalu, tworzą na niej trwałą warstewkę zapobiegającą bezpośredniemu stykaniu się powierzchni współpracujących. Właściwości smarne oleju mogą się poprawiać [L. 8].

PRZEDMIOT BADAŃ

Przedmiotem badań był mineralny olej sprężarkowy TZ-13, eksploatowany w amoniakalnych sprężarkach tłokowych w typowym zakładzie przemysłowym. Olej pochodził z centralnego zbiornika systemu odolejania amoniaku, gdzie trafiał z odolejaczy poszczególnych sprężarek. W toku normalnej eksploatacji traktowany jest przez użytkownika jako olej przepracowany.

Celem pracy było zbadanie właściwości tribologicznych oleju poddanego procesom uzdatniania w ustalonych warunkach zgodnie ze schematem przedstawionym na **Rys. 1**.



Rys. 1. Schemat blokowy procesu uzdatniania przepracowanego oleju sprężarkowego TZ-13

Fig. 1. Blok diagram of treatment process of worked compressor oil TZ-13

Proces uzdatniania realizowany był za pomocą modułowej instalacji stacjonarnej stwarzającej możliwość oczyszczania olejów metodami fizycznymi opartymi na procesach sedymentacji, rozdzielania w polu sił odśro-

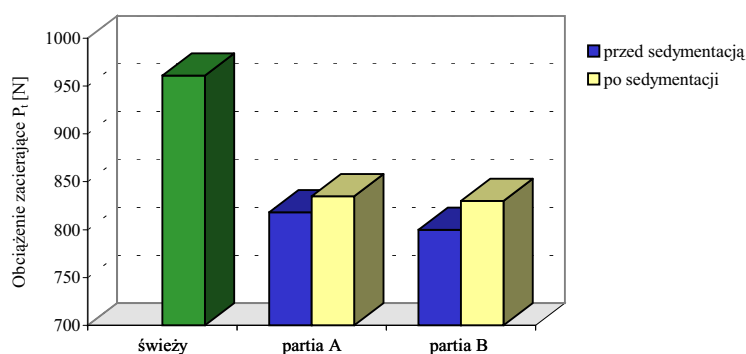
kowych (agregat wirówkowy) i filtracji przegrodowej z dokładnością filtracji $3\div 5\ \mu\text{m}$ oraz metodą fizykochemiczną za pomocą adsorbentów stałych. Dobór metod uzdatniania uwzględniał zmiany właściwości oleju stwierdzone w wyniku badań starzenia eksploatacyjnego oleju [L. 11, 12].

Efektywność uzdatniania oceniano na podstawie zmian właściwości smarnych olejów następujących w wyniku stosowania kolejnych procesów jednostkowych. Badania prowadzono za pomocą testera T-02 oraz T-05 zgodnie z metodami opracowanymi w Instytucie Technologii Eksploatacji [L. 13]. Elementami testowymi były kulki wykonane ze stali łożyskowej ŁH 15 oraz rolka wykonana ze stali konstrukcyjnej NC 30 oraz klocek z brązu BK 1. Badania prowadzono dla 12 partii uzdatnianego oleju.

WYNIKI BADAŃ

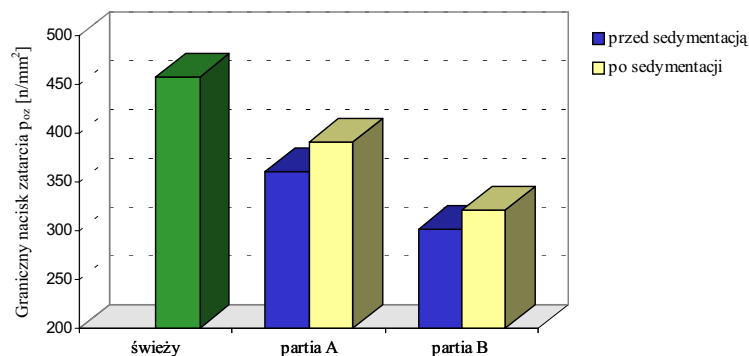
Efektywność uzdatniania oleju sprężarkowego oceniano na podstawie wskaźników wyznaczanych po badaniach przeprowadzonych za pomocą testera T-02: obciążenia zacierającego P_t oraz granicznego nacisku zatarcia p_{oz} . W celach porównawczych oceniono także właściwości świeżego oleju sprężarkowego pochodzącego z kilku partii.

Analiza wyników badań oleju po oczyszczeniu metodą sedymentacji wskazuje na korzystne zmiany właściwości smarnych oleju wyrażające się nieznacznym wzrostem obciążenia zacierającego (Rys. 2), granicznego nacisku zatarcia (Rys. 3). W celu pełnego zobrazowania zmian wyznaczanych parametrów dla wszystkich partii uzdatnianego oleju wyniki badań



Rys. 2. Zmiana obciążenia zacierającego przeprowadzonego oleju TZ-13 następująca po procesie sedymentacji

Fig. 2. The change of scuffing load for TZ-13 worked oil after sedimentation process



Rys. 3. Zmiana granicznego nacisku zatarcia przetworzonego oleju TZ-13 następująca po procesie sedymentacji

Fig. 3. The change of limiting pressure of seizure for TZ-13 worked oil after sedimentation process

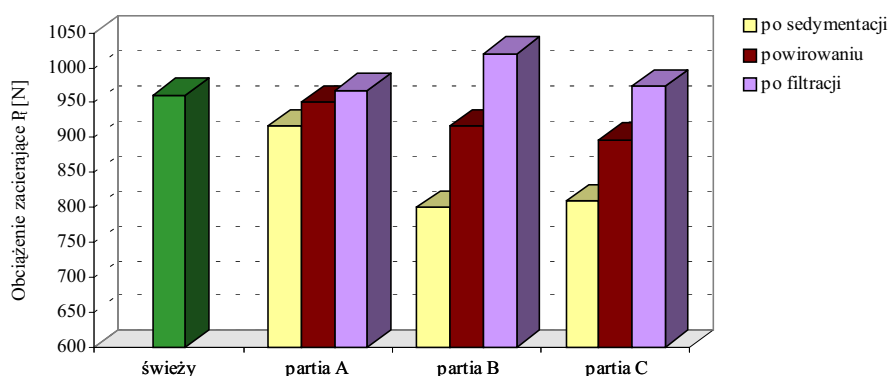
przedstawiono na przykładzie oleju przetworzonego charakteryzującego się największymi (partia A) i najmniejszymi (partia B) wartościami wyznaczanych wskaźników.

Z danych przedstawionych na **Rys. 2** wynika, że oczyszczanie oleju metodą sedymentacji przyczynia się do niewielkiego wzrostu wskaźnika P_t , zawierającego się w granicach ok. 2÷4%, przy czym uzyskana wartość znacznie odbiega od wartości charakterystycznej dla oleju świeżego. Niewielki wzrost wskaźnika wskazuje na niewielkie podwyższenie trwałości warstwy smarowej oleju po poddaniu go procesom sedymentacji. Ponieważ w procesie oczyszczania tą metodą usunięte zostają z oleju przede wszystkim zanieczyszczenia stałe o większych rozmiarach, woda i amoniak, wskazuje to na zmniejszenie negatywnego oddziaływania tych składników na elementy węzłów tarcia.

Również badania właściwości smarnych olejów w warunkach zacierania wskazują na pozytywny efekt oddziaływania procesu sedymentacji na właściwości smarne olejów. W wyniku przeprowadzenia procesu nastąpił ok. 6÷10% wzrost wartości granicznego nacisku zatarcia p_{oz} oczyszczonych olejów (**Rys. 3**). Dowodzi to zwiększenia odporności na zacieraanie elementów trących smarowanych olejem poddanych sedymentacji.

Ocena wpływu kolejnych metod: wirowania i filtracji przegrodowej oraz adsorpcji i filtracji na właściwości smarne oczyszczanych olejów wykazała, że po każdorazowym przeprowadzeniu zabiegów następowała poprawa właściwości smarnych oleju, jednakże zakres tych zmian był róż-

ny. Uzyskane wyniki badań zmian właściwości smarnych olejów przedstawiono na przykładzie olejów charakteryzujących się najmniejszymi (partia B) i największymi (partia A) wartościami wyznaczanych wskaźników zużycia przed poddaniem ich zabiegom uzdatniania. Przedstawiono też przykład średniej wartości omawianych parametrów z badanych partii oleju (partia C).

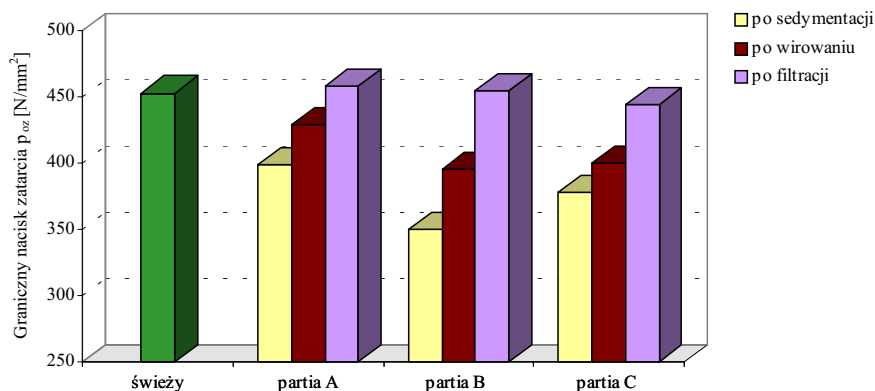


Rys. 4. Zmiana obciążenia zacierającego oleju TZ-13 następująca po procesie oczyszczania metodą wirówkową i filtracji na przegrodach

Fig. 4. The change of scuffing load for TZ-13 oil after cleaning process by means of centrifugal treatment and membrane filtration

Dane **Rys. 4** wskazują, że zarówno oczyszczanie za pomocą wirówki, jak i filtracja wykazują korzystny wpływ na właściwości smarne oleju. W wyniku ich zastosowania uzyskano znaczną poprawę wartości obciążenia zacierającego oleju, wskazującą na zwiększenie trwałości warstwy smarowej tworzonej przez olej po poddaniu go zabiegom wirowania i filtracji. Zastosowanie metody wirówkowej zapewnia zwiększenie wskaźnika P_t o 6,5÷14,5%. Następująca po niej filtracja przegrodowa umożliwia dalszy jego wzrost o 4,5÷13%. Bez względu na poziom wartości wskaźnika P_t wyznaczonego dla oleju po procesie sedymentacji, w wyniku zastosowania wirowania i filtracji następuje jego wzrost do poziomu zbliżonego, a nawet wyższego od poziomu ustalonego dla oleju świeżego. Wyższy poziom wskaźnika P_t wynika z faktu, iż olej TZ-13 nie zawiera w swoim składzie dodatków smarnych. W wyniku początkowych faz oksydacyjnego starzenia pojawiają się w nim związki polarne, które częściowo rozpuszczalne w oleju nie zostają z niego usunięte omawianymi metodami. Związki te mogą poprawiać właściwości smarne oleju.

Korzystny efekt oddziaływania wirowania i filtracji stwierdzono również w odniesieniu do granicznego nacisku zatarcia (**Rys. 5**).

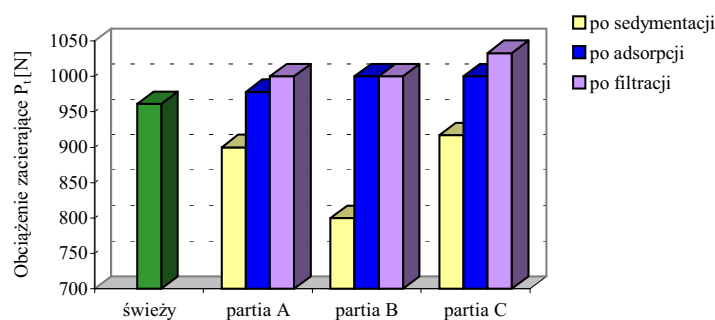


Rys. 5. Zmiana granicznego nacisku zatarcia oleju TZ-13 następująca po procesie oczyszczania metodą wirówkową i filtracji na przegrodach

Fig. 5. The change of limiting pressure of seizure of TZ-13 oil after cleaning process by means of centrifugal treatment and membrane filtration

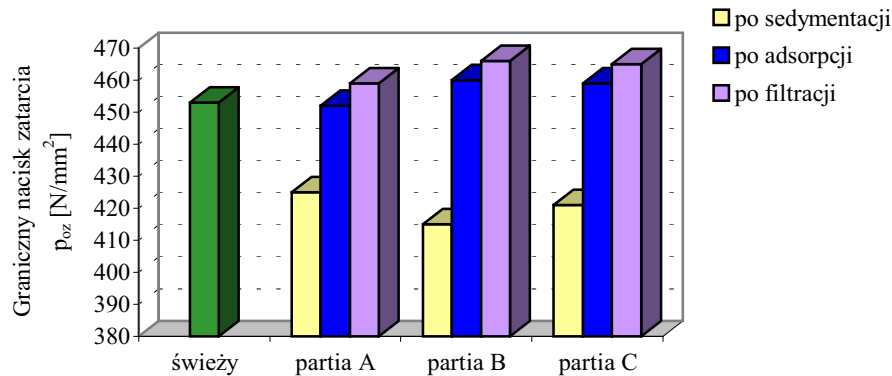
Dane **Rys. 5** wskazują, że po procesie oczyszczania metodą wirówkową nastąpił wzrost wskaźnika p_{oz} w granicach $7,5 \div 13\%$. Po filtracji jego wartość zwiększyła się o kolejne $7 \div 12,5\%$, co umożliwiło osiągnięcie lub zbliżenie się do wielkości charakterystycznej dla oleju świeżego.

Zmianę wartości wskaźników P_t i p_{oz} wyznaczonych po badaniach oleju uzdatnionego metodą adsorpcji i zastosowanej po niej filtracji przedstawiono na **Rys. 6** i **7**.



Rys. 6. Zmiana obciążenia zacierającego oleju TZ-13 następująca po procesie adsorpcji i filtracji na przegrodach

Fig. 6. The change of scuffing load for TZ-13 oil after adsorption process and membrane filtration

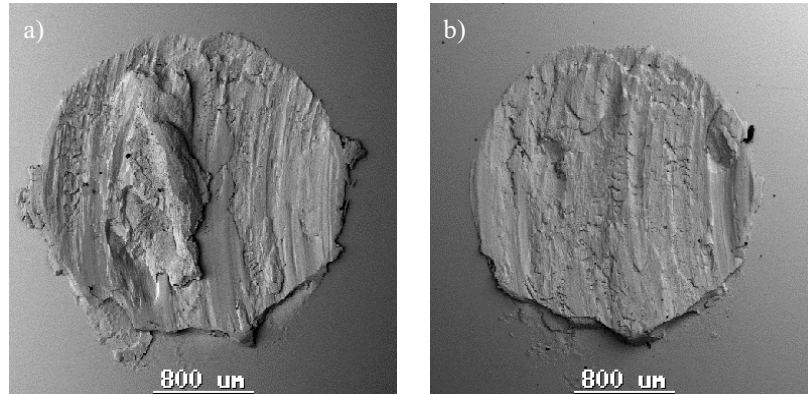


Rys. 7. Zmiana granicznego nacisku zatarcia oleju TZ-13 następująca po procesie adsorpcji i filtracji na przegrodach

Fig. 7. The change of limiting pressure of seizure of TZ-13 oil after adsorption process and membrane filtration

Dane na **Rys. 6 i 7** wskazują na korzystne oddziaływanie metody adsorpcyjnej i następującej po niej filtracji na trwałość filmu smarnego tworzonego przez olej, charakteryzowanego za pomocą wskaźnika P_t i na właściwości przeciwwzrostowe oleju w warunkach zacierania, opisywane wskaźnikiem p_{oz} . Większą skuteczność procesu stwierdzono po oczyszczeniu oleju metodą adsorpcji, zapewniającej wzrost wskaźników P_t i p_{oz} odpowiednio o $8,7 \div 25\%$ i $6,4 \div 10,8\%$. Zastosowanie filtracji przyczynia się do wzrostu wskaźnika P_t o $2,5 \div 3,3\%$ i wskaźnika p_{oz} o $1,3 \div 1,5\%$. Uzyskane wyniki badań wykazały, że większość badanych olejów po zabiegach uzdatniania adsorpcyjnego charakteryzowała się wielkością wyznaczonych parametrów zużycia zbliżoną do wyznaczonych dla oleju świeżego. W odniesieniu do właściwości smarnych następcze stosowanie etapu filtracji przyczynia się bardzo nieznacznie do ich poprawy, co wskazuje na fakt, iż etap ten pełni rolę przede wszystkim etapu doczyszczającego, umożliwiającego uzyskanie przez olej wymaganej klasy czystości.

W celu oceny wpływu opracowanych metod uzdatniania na stan warstwy wierzchniej elementów trących zbadano ślady tarcia na kulkach po testach przeprowadzonych za pomocą testera T-02. Do tego celu wykorzystano skaningową mikroskopię elektronową SEM/EDS. Badano kulki, które w czasie testu smarowane były olejem przed i po zabiegach uzdatniania. Obrazy skaningowe śladów zużycia po badaniach oleju przepracowanego i oczyszczonego metodami fizycznymi (sedymentacja-wirowanie-filtracja) przedstawiono na **Rys. 8**.

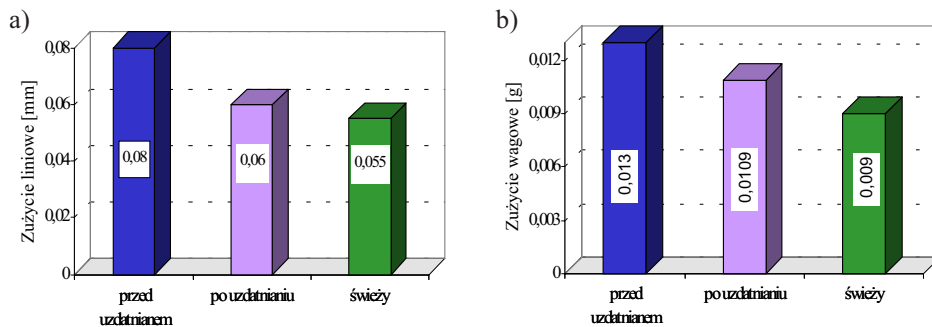


Rys. 8. Obraz skaningowy śladu zużycia charakterystyczny dla oleju: a) przed i b) po poddaniu go procesom uzdatniania

Fig. 8. SEM image of the wear scar typical of oil a) before and b) after treatment process

Obrazy skaningowe śladów zużycia na kulkach wskazują na korzystny wpływ uzdatniania na właściwości smarne oleju. Wskutek uzdatniania oleju nastąpiło zmniejszenie wielkości i korzystna zmiana wyglądu śladu polegająca na „wygładzeniu” jego powierzchni oraz zmniejszeniu bruzd charakterystycznych dla zużycia adhezyjnego.

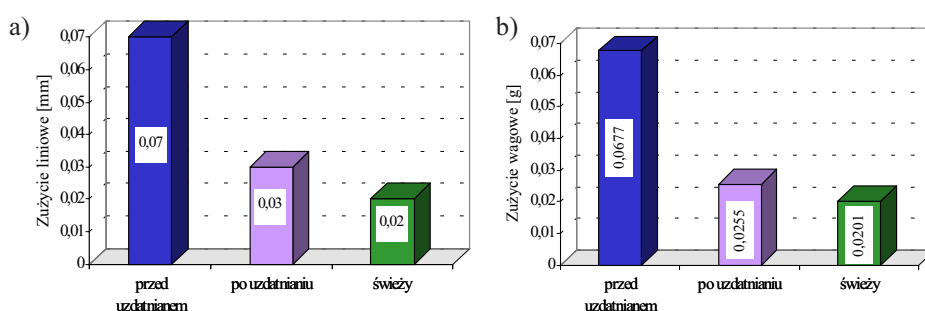
Ocena skuteczności uzdatniania olejów dokonana na podstawie testów przeprowadzonych za pomocą testera T-05 ze skojarzeniem rolka-kłosek o styku liniowym skoncentrowanym lub rozłożonym polegała na wyznaczeniu zużycia liniowego i wagowego elementów testowych. Wyniki uzyskane po badaniach oleju w skojarzeniu o styku liniowym skoncentrowanym i rozłożonym wskazują na korzystne oddziaływanie stosowanych procesów uzdatniania na właściwości smarne olejów sprężarkowych (Rys. 9 i 10).



Rys. 9. Przykładowe zużycie a) liniowe i b) wagowe klocka po badaniach oleju sprężarkowego w styku liniowym skoncentrowanym

Fig. 9. Wear: a) linear, and b) gravimetric for a block after tests in a linear contact

Z danych na **Rys. 9** wynika, że poddanie oleju sprężarkowego zabiegom uzdatniania przyczyniło się do 25%-ego zmniejszenia zużycia liniowego i 17%-ego wagowego klocka stanowiącego przeciwpróbkę w testach przeprowadzonych za pomocą testera T-05 ze skojarzeniem o styku liniowym skoncentrowanym. Uzyskana wartość jest wartością średnią z badanych przypadków. Próbkę w przeprowadzonych badaniach stanowiła rolka, jednak w żadnym analizowanym przypadku nie stwierdzono znaczącego jej zużycia.



Rys. 10. Przykładowe zużycie a) liniowe klocka i b) łączne wagowe węzła tarcia po badaniach oleju sprężarkowego w styku rozłożonym

Fig. 10. a) Block linear wear, and b) total gravimetric wear after tests in a conformal contact

Wyniki badań uzyskane po testach przeprowadzonych w skojarzeniu o styku rozłożonym (**Rys. 10**) wskazują na znaczny spadek zużycia liniowego (ponad 50%) oraz wagowego (ok. 60%) węzła tarcia następujący w wyniku smarowania go olejem poddanym uzdatnieniu. Znaczącego zużycia liniowego rolki nie stwierdzono w żadnym badanym przypadku. Stwierdzone obniżenie zużycia węzłów tarcia wskazuje na zmniejszenie niekorzystnych oddziaływań występujących w procesie tarcia, a tym samym efektywne oddziaływanie zastosowanych procesów uzdatniania na właściwości smarne olejów.

WNIOSKI

Korzystne zmiany właściwości smarnych olejów zachodzące w wyniku zastosowanych metod uzdatniania wskazują na celowość ich realizacji w odniesieniu do przepracowanych olejów sprężarkowych. Wyniki zrealizowanych badań wykazały, że w odniesieniu do olejów nie wykazujących

znaczących zmian chemicznych korzystne jest połączenie metod sedymentacji, wirowania i filtracji na przegrodach. W przypadku obecności w oleju takich zmian celowym jest stosowanie, zamiast wirowania, adsorpcji za pomocą adsorbentów stałych. Przedstawione metody umożliwiają na tyle efektywne uzdatnienie oleju, że jego właściwości tribologiczne osiągają poziom porównywalny z olejem świeżym. Uwzględniając poprawę właściwości fizykochemicznych uzdatnionych olejów do poziomu wymagań normatywnych dla oleju świeżego [L. 11, 12] można mówić o odtworzeniu potencjału eksploatacyjnego przepracowanych olejów sprężarkowych. Uzdatnione oleje mogą być ponownie kierowane do eksploatacji zgodnie z ich pierwotnym przeznaczeniem. Uzasadnione jest łączenie poszczególnych metod w odpowiednie sekwencje, zapewniające stopniową poprawę właściwości oleju i umożliwiające takie łączenie poszczególnych operacji, które pozwala na zachowanie dużej wydajności metody i wytwarzanie jak najmniejszej ilości odpadów.

Opracowana metoda znalazła praktyczne zastosowanie do uzdatniania olejów do amoniakalnych sprężarek chłodniczych, między innymi TZ-13, Clavus G 46 oraz Elfrima NH 46.

LITERATURA

1. Potrykus J., Wasiak Z., Wojciechowski T.: *Wieviel Schmierstoff darf es sein?* Tribologie und Schmierungstechnik. 1997, 4, s. 149, 151.
2. Marczak R.: *Badania materiałów tribologicznych*. Wybrane problemy tribologii. PWN. Warszawa, 1990.
3. Łuksa A.: *Użytkowanie i uzdatnianie środków smarowych*. Eksploatacja Maszyn. 1991, 3, s. 38, 40.
4. Zwierzycki W.: *Oleje i smary przemysłowe*. RN „Glimar” S.A. Gorlice, ITeE. Radom, 1999.
5. Jenecki J.: *Procesy zużywania*. Problemy Eksploatacji. 1998, 2, s. 155, 166.
6. Woropay M. i inni.: *Podstawy racjonalnej eksploatacji maszyn*. ITeE. Radom, 1996.
7. Wachal A.: *Wprowadzenie w problematykę starzenia olejów*. Trybologia. 1981, 2,3, s. 5, 17.
8. Nadolny K.: *Podstawy modelowania niezawodności materiałów eksploatacyjnych*. Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Eksploatacji. Radom, 1999.
9. Biernat K.: *Własności fizykochemiczne i metody badań produktów naftowych*. Wyd. ODK SIMP. Warszawa, 1986.

10. Reincherd i inni: *Zum Alterungsverhalten von Turbinenölen*. Schmierungstechnik. 1983, 5, s. 24,28.
11. Grądkowski M., Rogoś E.: *Przesłanki racjonalnej eksploatacji olejów smarowych w amoniakalnych sprężarkach chłodniczych*. Chłodnictwo. 2000, 1, 20,31.
12. Rogoś E.: *Metoda uzdatniania oleju do sprężarek amoniakalnych w eksploatacji*. Rozprawa doktorska. WITPiS, Sulejówek, 2001.
13. Szczerek M.: *Metodologiczne problemy systematyzacji eksperymentalnych badań tribologicznych*. ITeE. Radom, 1997.

Recenzent:
Janusz JANECKI

Summary

This paper presents the results of an effect of treatment methods on lubricating properties of compressor oils. The authors estimated anti-wear and antiseizure properties in scuffing conditions for oils that underwent the following processes: sedimentation, centrifugal force treatment, adsorption by means of a constant adsorber, and membrane filtration. The testing of lubricating properties was realized by means of a four-ball (T-02) and block-on-ring (T-05) testers.

Results show that all employed elementary operations that constituted treatment process improve lubricating properties of the compressor oil. All of them do not do it to the same degree. This research shows that is important to combine elementary processes in a sequence to improve the lubricating properties of treated oils to a degree typical of a raw oil. The advantageous influence of the treatment of lubricating oils has been confirmed by tests using the T-05 tester.

Elżbieta ROGOS^{*}, Andrzej URBAŃSKI^{*}, Joanna KARAS^{*}

WŁAŚCIWOŚCI TRIBOLOGICZNE SIARKOWANYCH OLEJÓW ROŚLINNYCH

TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF SULFURIZED VEGETABLE OILS

Słowa kluczowe

oleje roślinne, siarkowanie, właściwości przeciwzużyciowe, właściwości przeciwzatarciowe

Key-words

vegetable oils, sulfurization, antiwear properties, antiseizure properties

Streszczenie

W artykule omówiono właściwości tribologiczne olejów roślinnych poddanych procesowi siarkowania. Badano działanie przeciwzatarciowe i przeciwzużyciowe oleju rzepakowego i słonecznikowego, również w warunkach ekstremalnych wymuszeń. Badania realizowano za pomocą aparatu czterokulowego oraz testera T-02.

W wyniku przeprowadzonych badań wykazano, że wprowadzenie siarki ma zróżnicowany wpływ na właściwości przeciwzużyciowe roślinnej

^{*} Instytut Technologii Eksploatacji (ITeE), Zakład Tribologii, ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, tel. (0-48) 36-442-41.

bazy olejowej, natomiast zdecydowanie poprawia jej właściwości przeciwzatarciowe. Wielkość zmian ocenianych właściwości uzależniona jest od rodzaju oleju, oraz od ilości i warunków wprowadzania do nich siarki. Ocena właściwości smarnych olejów w warunkach zacierania wykazała szczególnie korzystne oddziaływanie siarki na właściwości oleju rzepakowego. Wprowadzenie siarki do tego oleju znacznie zwiększa odporność na zacieranie węzła tarcia smarowanego siarkowanym olejem w porównaniu do węzła smarowanego olejem bazowym.

WPROWADZENIE

Konwencjonalne środki smarowe z ropy naftowej stanowią zagrożenie ekologiczne dla człowieka i jego otoczenia [L. 1]. Szkodliwe są składniki bazy naftowej, dodatków uszlachetniających oraz powstające podczas eksploatacji produkty przemian termooksydacyjnych [L. 2]. Obniżenie negatywnych oddziaływań gospodarki naftowymi środkami smarnymi na ekosystem spowodowało wzrost zainteresowania produktami o mniejszej szkodliwości ekologicznej np. opartymi na bazach pochodzenia roślinnego i zwierzęcego. Zaletami olejów roślinnych są także dobre właściwości przeciwzużyciowe, lepkościowo-temperaturowe, przeciwkorozyjne i przeciwpienne [L. 3, 4]. Jednak zastosowanie olejów roślinnych do wytwarzania środków smarowych wymaga zmiany ich struktury chemicznej lub wprowadzenia dodatków uszlachetniających w takim zakresie, aby uzyskać kompozycję o właściwościach zbliżonych do produktów pochodzenia naftowego. Jedną z dróg modyfikacji olejów roślinnych w kierunku uzyskania środków smarowych pracujących w warunkach wysokich obciążeń jest ich siarkowanie.

METODA BADAŃ

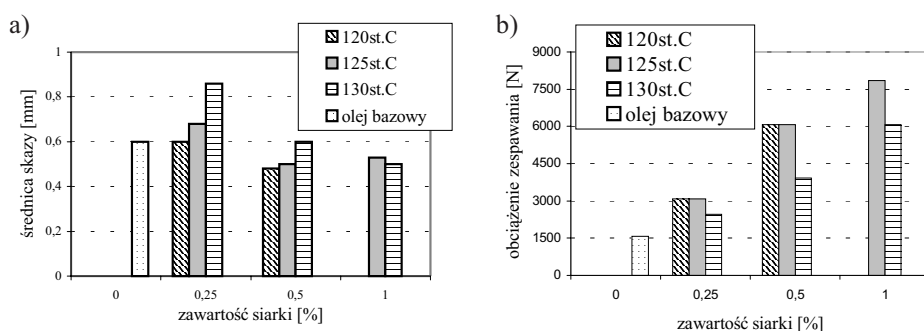
Przedmiotem badań były różniące się składem chemicznym rafinowane oleje: rzepakowy i słonecznikowy poddawane procesowi siarkowania w różnych warunkach. Zmiennymi parametrami procesu była temperatura, obecność katalizatora oraz ilość wprowadzanej siarki. Wariantowaną ilość siarki w zakresie 0,25÷1% i 7÷10% wprowadzano odpowiednio do oleju rzepakowego i słonecznikowego, a następnie prowadzono proces w temperaturze 120, 125 i 130°C z udziałem lub bez katalizatora.

Efektywność działania siarki wprowadzonej do oleju rzepakowego i słonecznikowego oceniano na podstawie zmian właściwości smarnych

olejów następujących w wyniku siarkowania. Badania prowadzono zgodnie z normą PN-76/C-04147 za pomocą aparatu czterokulowego oraz z metodami opracowanymi w Instytucie Technologii Eksploatacji przy zastosowaniu testerów T-02 [5] i T-18 [6]. Elementami testowymi były kulki wykonane ze stali łożyskowej ŁH 15 oraz tuleja ze stali 45 i gwintownik M10. Badania właściwości przeciwwzrostowych za pomocą aparatu czterokulowego prowadzono przy stałym obciążeniu 392,1 N i prędkości 1450 obr./min. w czasie 1 h. Ocenę właściwości smarnych przeprowadzono za pomocą urządzenia T-02 prowadzono przy liniowo narastającym obciążeniu węzła tarcia przy prędkości obrotowej wrzeciona 500 obr./min., prędkości narastania obciążenia 409 N/s oraz maksymalnym obciążeniu węzła 7200 N. Wyznaczano wartość obciążenia zacierającego P_z , będącego miarą trwałości filmu smarnego tworzonoego przez olej oraz granicznego nacisku zatarcia p_{oz} , charakteryzującego właściwości smarne oleju w warunkach zacierania. Za pomocą testera T-18 oceniano moment oporów ruchu przy gwintowaniu z prędkością 240 obr./min. w obecności badanego oleju.

WYNIKI BADAŃ

Badania właściwości smarnych przeprowadzone za pomocą aparatu czterokulowego wykazały, że zarówno właściwości przeciwwzrostowe, jak i przeciwzatarciowe siarkowanych olejów roślinnych zależą od warunków procesu siarkowania: ilości związanej siarki, temperatury procesu i obecności katalizatora. Wpływ warunków siarkowania jest bardzo zróżnicowany (Rys.1 i 2).



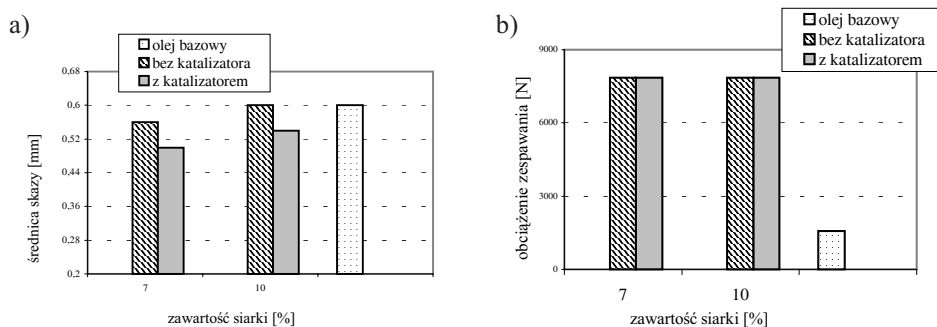
Rys. 1. Wpływ warunków siarkowania na właściwości a) przeciwwzrostowe i b) przeciwzatarciowe oleju rzepakowego

Fig. 1. The influence of sulfurization conditions on tribological properties of the rapeseed oil: a) antiwear properties, b) antiseizure properties

Analiza danych zestawionych na **Rys. 1a** wskazuje, że wprowadzenie 0,25% siarki do oleju rzepakowego pogarsza jego właściwości przeciwzużyciowe. Zwiększenie udziału siarki do 0,5 i 1% powoduje ich poprawę. Właściwości przeciwzużyciowe oleju zawierającego 0,25 i 0,5% siarki pogarszają się wraz ze wzrostem temperatury siarkowania i poprawiają w miarę zwiększania udziału siarki. Wprowadzenie 1% siarki poprawia oceniane właściwości oleju rzepakowego siarkowanego w temperaturze 130°C, nieznacznie pogarsza po procesie przeprowadzonym w temperaturze 125°C. W temperaturze 120°C siarka nie została całkowicie związana – oleju nie badano. Najmniejszą średnicą skazy charakteryzuje się olej rzepakowy siarkowany w temperaturze 125°C zawierający 0,5% siarki oraz w temperaturze 130°C z 1% udziałem siarki. Najskuteczniej chroni on węzeł tarcia przed zużyciem.

Analiza właściwości przeciwzatarciowych wykazała systematyczny wzrost wartości obciążenia zespawania wraz ze wzrostem zawartości siarki w oleju rzepakowym (**Rys. 1b**). Jednocześnie stwierdzono niekorzystny wpływ podwyższenia temperatury siarkowania ze 120 i 125 do 130°C na wartość ocenianego parametru. We wszystkich badanych przypadkach właściwości przeciwzatarciowe oleju pogorszyły się. Największą zdolność przeciwdziałaniu zatarciu wykazuje olej zawierający 1% siarki (temperatura procesu – 125°C).

Wyniki badań uzyskane po testach przeprowadzonych dla oleju słonecznikowego wskazują, że wprowadzenie siarki do tego oleju nieznacznie poprawia jego właściwości przeciwzużyciowe i bardzo znacząco prze-



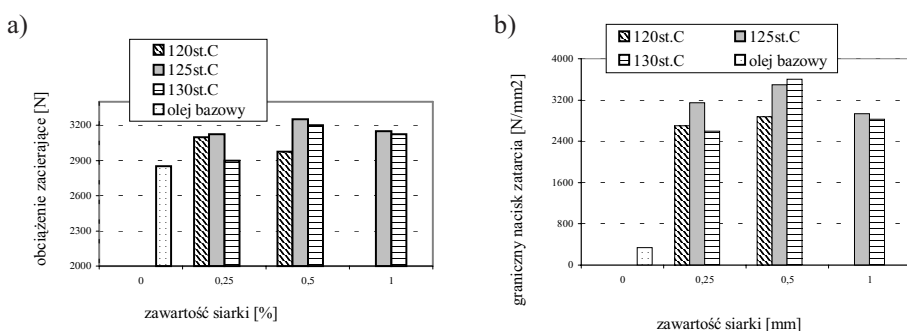
Rys. 2. Wpływ warunków siarkowania na właściwości a) przeciwzużyciowe i b) przeciwzatarciowe oleju słonecznikowego

Fig. 2. The influence of sulfurization conditions on tribological properties of the sunflower oil: a) antiwear properties, b) antiseizure properties

ciwzatarciowe (**Rys. 2**). Obecność siarki w niewielkim stopniu obniża średnicę skazy na kulkach testowych (**Rys. 2a**), przy czym olej zawierający 7% pierwiastka wykazuje skuteczniejszą ochronę węzła tarcia przed zużyciem niż olej zawierający go 10%. Prowadzenie procesu siarkowania z udziałem katalizatora w niewielkim stopniu wpływa na właściwości przeciwzużyciowe oleju słonecznikowego – przyczynia się do zmniejszenia średnicy skazy na kulkach testowych o ok. 0,1%.

Przeprowadzone badania wykazały bardzo dobre właściwości przeciwzatarciowe siarkowanego oleju słonecznikowego (**Rys. 2b**). We wszystkich badanych przypadkach stwierdzono ponad 8-krotny wzrost wartości obciążenia zespawania siarkowanego oleju w odniesieniu do oleju bazowego. Obecność katalizatora w procesie siarkowania nie zmienia ocenianych właściwości oleju słonecznikowego.

Ocena właściwości smarnych siarkowanego oleju rzepakowego po testach przeprowadzonych za pomocą testera T-02 wskazuje, że zarówno wartości obciążenia zacierającego P_z , jak i granicznego nacisku zatarcia p_{oz} przewyższają wartości uzyskane dla oleju bazowego (**Rys. 3**). Proces siarkowania korzystnie wpływa na trwałość warstwy smarowej i właściwości przeciwzużyciowe w warunkach zacierania oleju rzepakowego.



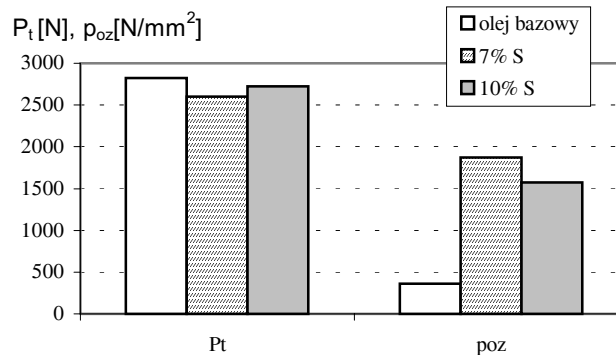
Rys. 3. Wpływ warunków siarkowania oleju rzepakowego na wartość a) obciążenia zacierającego i b) granicznego nacisku zatarcia wyznaczone za pomocą testera T-02

Fig. 3. The influence of sulfurization conditions on tribological properties of the rapeseed oil on: a) scuffing load, b) limiting pressure of seizure

Najkorzystniejszymi właściwościami smarnymi ocenianymi za pomocą testera T-02 charakteryzują się oleje siarkowane w temperaturze 125°C (**Rys. 3**). Wykazują one najwyższe wartości obydwu wyznaczanych para-

metrów. Spośród nich najwyższą trwałość tworzonego filmu smarnego charakteryzowanego za pomocą wartości obciążenia zacierającego wykazuje olej zawierający 0,5% siarki (**Rys. 3a**). Zwiększenie lub zmniejszenie udziału siarki oraz obniżenie lub podwyższenie temperatury siarkowania obniża wartość obciążenia zacierającego. Wartość parametru wyznaczona dla oleju siarkowanego w temperaturze 125°C zawierającego 0,5% pierwiastka jest o ok. 30% wyższa niż dla oleju bazowego. Wyznaczone dla siarkowanego oleju rzepakowego wartości granicznego nacisku zatarcia (**Rys. 3b**) wskazują bardzo korzystny wpływ siarkowania na jego właściwości przeciwzużyciowe w warunkach zacierania. We wszystkich badanych przypadkach stwierdzono 9÷10-krotny wzrost tego parametru w odniesieniu do oleju bazowego. Najwyższą wartość wyznaczonego wskaźnika stwierdzono po badaniu oleju zawierającego 0,5% siarki po procesach przeprowadzonych w temperaturze 125 i 130°C.

Wyniki uzyskane po badaniach oleju słonecznikowego za pomocą testera T-02 wskazują, że siarkowanie nieznacznie obniża trwałość filmu smarnego tworzonego przez ten olej i znacznie podwyższa jego właściwości przeciwzużyciowe w warunkach zacierania (**Rys. 4**).



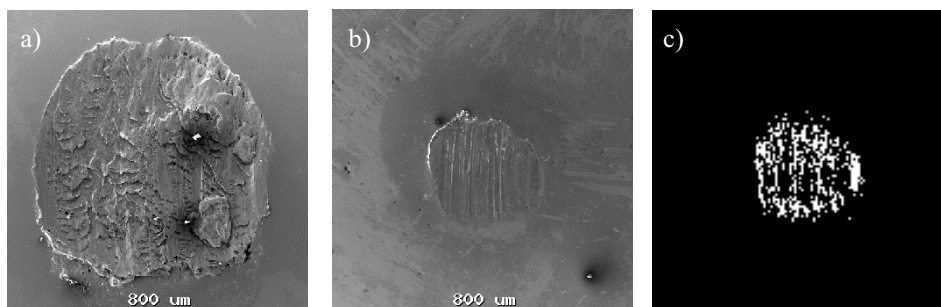
Rys. 4. Wpływ warunków siarkowania oleju słonecznikowego na wartość obciążenia zacierającego P_t i granicznego nacisku zatarcia p_{oz} wyznaczone za pomocą testera T-02

Fig. 3. The influence of sulfurization conditions on tribological properties of the sunflower oil on: a) scuffing load, b) limiting pressure of seizure

Wartość obciążenia zacierającego P_t po procesie siarkowania obniża się o ok. 6 lub 3% odpowiednio po wprowadzeniu 7 i 10% siarki do bazowego oleju słonecznikowego. Natomiast wartość granicznego nacisku zatarcia p_{oz} wzrasta odpowiednio ok. 5- i 4-krotnie. Dane **Rys. 4** wskazują, że

olej słonecznikowy zawierający 7% siarki charakteryzuje się korzystniejszymi właściwościami smarnymi niż olej z 10%-ym udziałem tego pierwiastka. Tworzy on nieco mniej trwały film smarny, ale bardziej chroni węzeł tarcia przed zatarciem w warunkach ekstremalnych wymuszeń.

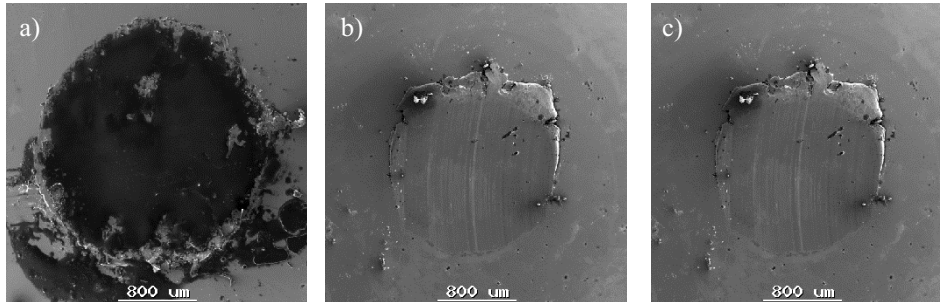
Analiza powierzchni śladu na kulkach testowych przeprowadzona za pomocą mikroanalizy rentgenowskiej SEM-EDS potwierdziła różny wpływ siarkowania na właściwości smarne olejów roślinnych. Obrazy skaningowe śladów zużycia na kulkach po testach przeprowadzonych za pomocą testera T-02 potwierdzają korzystny wpływ siarkowania na właściwości przeciwwzużyciowe w warunkach zacierania oleju rzepakowego (**Rys. 5a** i **5b**) oraz słonecznikowego (**Rys. 6a** i **6b**). Wprowadzenie siarki zmniejsza tendencję do szczepień adhezyjnych oraz wielkość śladu zużycia na kulce testowej. Korzystniejszy wpływ siarkowania stwierdzono dla oleju rzepakowego. Po badaniach tego oleju stwierdzono wyraźne zmniejszenie wielkości śladu na kulce testowej oraz jego „wygładzenie”. Wskutek siarkowania oleju słonecznikowego wielkość śladu na kulce testowej zmniejszyła się w mniejszym stopniu, natomiast nastąpiła wyraźna poprawa struktury śladu.



Rys. 5. Obraz skaningowy śladu zużycia na kulce testowej po badaniach a) oleju rzepakowego i b) siarkowanego oleju rzepakowego oraz c) analiza rentgenowska rozkładu powierzchniowego siarki na kulce

Fig. 5. SEM image of the wear scar on the test ball after testing: a) rapeseed oil, b) sulfurized rapeseed oil, c) EDS map for surface distribution of sulfur in the wear scar

Mapy rozkładu powierzchniowego siarki na kulkach testowych po badaniach siarkowanego oleju rzepakowego (**Rys. 5c**) i słonecznikowego (**Rys. 6c**) wskazują na znaczny udział siarki w warstwie wierzchniej śladów zużycia, co wskazuje na tworzenie się – w warunkach wysokich wymuszeń – związków siarki z powierzchnią stali. Dzięki temu zwiększa się



Rys. 6. Obraz skaningowy śladu zużycia na kulce testowej po badaniach a) oleju słonecznikowego i b) siarkowanego oleju słonecznikowego oraz c) analiza rentgenowska rozkładu powierzchniowego siarki na kulce

Fig. 6. SEM image of the wear scar on the test ball after testing: a) sunflower oil, b) sulfurized sunflower oil, c) EDS map for surface distribution of sulfur in the wear scar

odporność węzła tarcia na zacieranie. Korzystniejsze właściwości siarkowanego oleju rzepakowego w odniesieniu do oleju rzepakowego wynikają z równomiernego rozkładu siarki w powierzchni śladu zużycia.

Badania przeprowadzone za pomocą testera T-18 wykazały, że wprowadzenie siarki nie zmienia wartości momentu oporów ruchu przy gwintowaniu w obecności oleju rzepakowego.

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania wykazały, że wprowadzenie do oleju roślinnego siarki zmienia jego właściwości smarne zależnie od rodzaju oleju i parametrów procesu siarkowania. Przede wszystkim poprawia właściwości przeciwwzatarciowe oleju słonecznikowego oceniane za pomocą aparatu czterokulowego oraz zwiększa właściwości przeciwwzatarciowe i przeciwzużyciowe w warunkach ekstremalnych wymuszeń oleju rzepakowego oceniane za pomocą testera T-02. W przypadku oleju słonecznikowego skuteczność działania siarki przejawia się kilkukrotnym wzrostem wartości obciążenia zespawania. Po badaniach oleju rzepakowego stwierdzono mniejszy wzrost tego parametru oraz znaczny obciążenia zacierającego i granicznego nacisku zatarcia, parametrów odzwierciedlających trwałość filmu smarnego oraz odporność na zacieranie węzła tarcia.

Wyniki przeprowadzonych badań wykazały zróżnicowany wpływ parametrów procesu siarkowania na właściwości smarne olejów roślinnych. Najkorzystniejszymi właściwościami smarnymi charakteryzuje się olej rze-

pakowy siarkowany w temperaturze 125°C, do którego wprowadzono 0,5% siarki oraz olej słonecznikowy zawierający 7% pierwiastka.

Analiza uzyskanych wyników badań wskazuje, że podczas komponowania ekologicznych środków smarowych przeznaczonych do pracy w warunkach wysokich obciążeń korzystnie jest stosować siarkowany olej rzepakowy w charakterze oleju bazowego.

LITERATURA

1. Gawrońska H., Górski W.: *Biodegradowalność i ekotoksyczność wybranych rodzajów cieczy eksploatacyjnych*. Paliwa, oleje i smary w eksploatacji, 1999, 68, s. 5÷14.
2. Włostowska E.: *Oleje a środowisko*. Paliwa, Oleje i Smary w Eksploatacji, 1993, 7, s. 4÷6.
3. Rogoś E., Urbański A., Grądkowski M.: *Właściwości smarne wybranych olejów roślinnych*. Tribologia, 2001, nr 3.
4. Górski W., Ostaszewski W., Wiślicki B.: *Krajowe oleje roślinne-surowcem dla paliw silnikowych i olejów smarowych*. Paliwa, Oleje i Smary w Eksploatacji, 2001, 90, s. 5÷11.
5. Dimmig Th. I inni: *Additivkomponenten auf Basis nativer Ölen*. Tribologie und Schmierungstechnik, 1994, 6, s. 329÷336.
6. Szczerek M., Tuszyński W.: *Badania tribologiczne. Zacieranie*. ITeE, Radom, 2000.
7. Michalczewski R. I inni.: *Nowe urządzenia w systemie badań tribologicznych do testowania specjalnych węzłów tarcia*. Problemy Eksploatacji, 2002, 3, s. 215÷223.

Recenzent:
Janusz JANECKI

Summary

This paper presents tribological properties of vegetable oils that were sulfurized. The authors tested antiwear and antiseizure properties of rapeseed and sunflower oils, also in extreme-pressure conditions. The tests were realized using a four-ball tester. As a result of executed tests the authors show that sulfurization has a diversified influence on antiwear properties of oils with vegetable base and improves their antiseizure properties. The changes in the properties depend on the oil type and on

the quantity and the sulfurization conditions. The results show a very good influence of sulfurization on the properties of the rapeseed oil. Sulfurization of the rapeseed oil considerably increases antiseizure properties in comparison with base oils.

Jan SADOWSKI*, Leszek SARNOWICZ*

BADANIA KALORYMETRYCZNE SKŁADOWEJ CIEPLNEJ I MECHANICZNEJ OPORÓW TARCIA

CALORIMETRIC RESEARCH OF THE THERMAL AND MECHANIC COMPONENTS OF FRICTION RESISTANCE

Słowa kluczowe:

Część cieplna i mechaniczna oporów tarcia, pierwsza zasada termodynamiki, badania kalorymetryczne, temperatura.

Keywords:

Thermal and mechanic parts of friction resistance, thermodynamic first principle, calorimetric research, temperature

Streszczenie

W pracy wykazano, że podział oporów tarcia na część cieplną i mechaniczną wynika bezpośrednio z równania pierwszej zasady termodynamiki dla systemów otwartych. Zaproponowano metodę oceny tych części na podstawie badań kalorymetrycznych procesu tarcia i zużycia ustabilizowanego stali gat. 45. Przytoczono wyniki tych badań i uzupełniono je interpretacją fizyczną.

* Politechnika Radomska, ul. Malczewskiego 29, 26–600 Radom

WPROWADZENIE

Jednym z podstawowych zagadnień, którymi zajmuje się tribologia jest interpretacja natury oporów tarcia. Poznaniu tej natury poświęcono wiele prac teoretycznych i eksperymentalnych. Ich rezultatem są modele interpretacyjne tarcia (zwane tradycyjnie teoriami), przedstawiające naturę tarcia jako: mechaniczną, molekularną, molekularno-mechaniczną lub energetyczną. Autorzy niniejszej pracy zajmowali się termodynamiczną interpretacją oporów tarcia, którą można zaliczyć do ostatniego z wymienionych – ujęcia energetycznego. Ujęcie to, w odróżnieniu od poprzednich, traktuje tarcie systemowo, to znaczy analizuje się zarazem: dyssypację energii, zużywanie tribologiczne i inne oddziaływania energetyczne zachodzące w układzie trących się ciał stałych. Układ taki, zwany systemem tribologicznym, utożsamia się z termodynamicznym systemem otwartym [L. 1]. Podstawą opisu analitycznego przemian energetycznych w tym systemie jest pierwsza zasada termodynamiki fenomenologicznej. Można z niej wyprowadzić wnioski o naturze oporów tarcia i ustalić ich strukturę energetyczną. W niniejszej pracy wykazano, że natura siły tarcia i współczynnika tarcia może być rozumiana jako ciepłno-mechaniczna. Zaproponowano również sposób oceny części składowych oporów tarcia w oparciu o badania kalorymetryczne bilansu energetycznego procesu tarcia. Ponadto podano przykład tych badań dotyczących tarcia i zużywania ustabilizowanego próbek stalowych. Uwidoczniono wpływ temperatury na strukturę oporów tarcia. Pokazano także, iż sterowanie strukturą oporów tarcia poprzez zewnętrzny wpływ na procesy cieplne zachodzące w systemie tribologicznym warunkuje przebieg zużywania tribologicznego.

CIEPLNO-MECHANICZNA NATURA OPORÓW TARCIA

Określenie tarcia jako procesu doprowadzania energii mechanicznej do pary trącej (traktowanej w dalszym ciągu jako system termodynamiczny otwarty [L. 1]), wskutek czego jest ona całkowicie rozpraszana może być źródłem nowej interpretacji oporów tarcia i ich miary – współczynnika tarcia w oparciu o równanie pierwszej zasady termodynamiki. Tym samym uzyskany opis oporów tarcia będzie posiadał rangę prawa ogólnego, a dokładniej zasady, której prawidłowość nie została zakwestionowana. Równanie pierwszej zasady termodynamiki dla systemów otwartych ma następującą postać:

$$\Delta U = -\Delta I - Q_{1-2} + A_{t1-2} \quad (1)$$

gdzie: ΔU – zmiana energii wewnętrznej systemu, ΔI – zmiana entalpii systemu ($\Delta I = i \cdot \Delta m$, gdzie i – entalpia właściwa produktów zużycia [J/g], Δm zużycie tribologiczne systemu [g]), Q_{1-2} – ciepło, A_{t1-2} – praca tarcia. Wyszczególnione wielkości wyrażone są w dżulach.

Praca A_{t1-2} siły tarcia $T(\tau)$, przy względnej prędkości poślizgu ciał $v(\tau)$, po upływie czasu tarcia t określa się następująco:

$$A_{t1-2} = \int_0^t T(\tau) \cdot v(\tau) \cdot d\tau \quad (2)$$

gdzie: τ – czas [s]; $0 \leq \tau \leq t$.

Równa się ona sumie ciepła dyssypacji Q_{dyss} powodującego nagrzewanie i pracy dyssypacji mechanicznej A_{dyss} – powodującej mechaniczne rozdrabnianie materiału [L. 1].

$$A_{t1-2} = A_{dyss} + Q_{dyss} \quad (3)$$

Ponieważ praca dyssypacji mechanicznej A_{dyss} jest tylko częścią η ($\eta < 1$) pracy tarcia A_{t1-2} , to można ją określić następująco:

$$A_{dyss} = \int_0^t \eta(\tau) \cdot T(\tau) \cdot v(\tau) \cdot d\tau \quad (4)$$

Natomiast ciepło dyssypacji określa zależność

$$Q_{dyss} = \int_0^t [1 - \eta(\tau)] \cdot T(\tau) \cdot v(\tau) \cdot d\tau \quad (5)$$

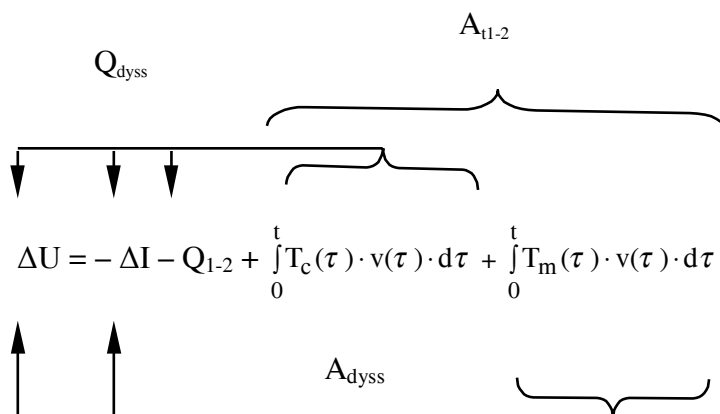
Na podstawie twierdzenia o pochodnej całki jako funkcji jej górnej granicy uzyskuje się, uwzględniając (2–5), zawiązki [L. 1]:

$$T(t) \cdot v(t) = \underbrace{[1 - \eta(t)] \cdot T(t) \cdot v(t)}_{T_c(t)} + \underbrace{\eta \cdot T(t) \cdot v(t)}_{T_m(t)}, \quad (6)$$

czyli

$$T(t) = T_c(t) + T_m(t). \quad (7)$$

Może ono służyć do zilustrowania oddziaływań energetycznych w dowolnym systemie tribologicznym, który stanowią dwa trące się ciała stałe. Struktura tych oddziaływań na makroskopowym poziomie organizacji materii przedstawia się następująco [L. 1, 2] – **Rysunek 1**:



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie struktury oddziaływań energetycznych w systemie tribologicznym [L. 1, 2]

Fig. 1. Scheme of energetic interaction in the tribological system [L. 1, 2]

Z powyższego schematu wynika, że odpowiedzią systemu na wykonanie pracy dyssypacji mechanicznej A_{dyss} , a więc pracy siły tarcia T_m , jest powstanie produktów zużycia i usunięcie ich poza granice systemu ($-\Delta m$) wraz z pewnym zasobem energii (część przyrostu entalpii $-\Delta I = -i \cdot \Delta m$), ponadto następuje nagromadzenie energii wewnętrznej potencjalnej w warstwie wierzchniej związanej w nowo utworzonymi defektami budowy materii (część przyrostu energii wewnętrznej ΔU). Z kolei ciepło dyssypacji Q_{dyss} , równe pracy siły tarcia T_c , przyczynia się do przekazania energii do otoczenia na sposób ciepła ($-Q_{t1-2}$), do zwiększenia energii wewnętrznej systemu (część przyrostu energii wewnętrznej ΔU) na skutek nagrzewania jego elementów oraz do zwiększenia energii odprowadzanej do otoczenia z usuwanymi produktami zużycia (część przyrostu entalpii $-\Delta I$) na skutek ich nagrzewania.

W badaniach kalorymetrycznych bierze się pod uwagę procesy stacjonarne, stąd część cieplna T_c oporów tarcia kinetycznego T nie zależy od czasu i może być opisana wzorem [L. 1, 2]

$$T_c = (1 - \eta) \cdot T, \quad (8)$$

a część mechaniczną T_m określa się następująco:

$$T_m = \eta \cdot T. \quad (9)$$

Siły: T , T_c i T_m wywołane są działaniami siły docisku N ciał 1 i 2 do siebie. Zatem możliwa jest także termodynamiczna interpretacja współczynnika tarcia kinetycznego μ . Po podzieleniu obu stron równania (7) przez wielkość N uzyskuje się zależność [L. 1, 2]

$$\mu = \frac{T}{N} = \frac{T_c}{N} + \frac{T_m}{N} = \mu_c + \mu_m \quad (9)$$

Współczynnik tarcia kinetycznego jest więc sumą cieplnego współczynnika tarcia μ_c i mechanicznego współczynnika tarcia μ_m . Pierwszy z nich wiąże się z nagrzewaniem ciernym systemu tribologicznego i powstających produktów zużycia oraz otoczenia; drugi – z powiększaniem energii wewnętrznej potencjalnej systemu (w otoczeniu nowych defektów struktury materii) i ze zużywaniem tribologicznym.

BADANIA KALORYMETRYCZNE STRUKTURY OPORÓW TARCIA

Przedmiotem badań w niniejszej pracy jest równanie bilansu energii charakteryzujące proces tarcia technicznie suchego i ustabilizowanego zużycia utleniającego metali. W procesie tym, zarówno moc mechaniczna tarcia \dot{A} [W], strumień ciepła dyssypacji \dot{Q}_{dyss} [W] oraz strumień powstających produktów zużycia są traktowane jako niezależne od czasu t . Z produktami zużycia związana jest moc dyssypacji mechanicznej \dot{A}_{dyss} [W], którą w dalszym ciągu będzie się wyznaczać jako różnicę

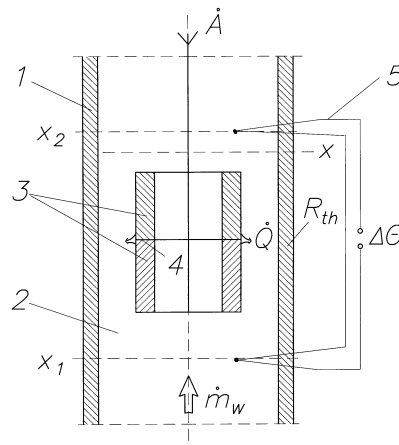
$$\dot{A}_{dyss} = \dot{A} - \dot{Q}_{dyss} \quad (10)$$

Dla przyjętego czasu tarcia w warunkach stacjonarnych praca tarcia $A = \dot{A} \cdot t$ [J], ciepło tarcia $Q_{dyss} = \dot{Q}_{dyss} \cdot t$ [J] oraz praca dyssypacji mecha-

nicznej $A_{\text{dys}} = \dot{A}_{\text{dys}} \cdot t$ [J]. Do wyznaczenia pracy tarcia A przyjęto dane uzyskane na stanowisku badawczym (tribokalorymetrze), mianowicie siłę tarcia T , prędkość tarcia v i czas t . Wartość tej pracy określa zależność

$$A = T \cdot v \cdot t. \quad (11)$$

W celu wyznaczenia ciepła dyssypacji Q_{dys} zastosowano kalorymetr przepływowy, którego schemat przedstawia rys. 2. Składa się ono z obudowy 1 o pewnym oporze cieplnym R_{th} wewnątrz której przepływa medium 2 z natężeniem \dot{m}_w [g/s]. Para trąca 3 jest usytuowana wewnątrz obudowy 1 a sam styk tarcowy 4 – źródło ciepła dyssypacji – jest chroniony przed dostępem medium 2 . W przekrojach x_1 i x_2 znajduje się spoina pomiarowa termopary różnicowej 5 , służącej do pomiaru różnicy temperatury $\Delta q = \Theta(x_1) - \Theta(x_2)$ spowodowanej przez strumień ciepła tarcia. Różnica strumieni entalpii $\dot{I}(x_1) - \dot{I}(x_2)$ zaobserwowana w przekrojach x_1 i x_2 rury 1 , równa jest strumieniowi cieplnemu \dot{Q} [L. 3].



Rys. 2. Schemat kalorymetru przepływowego

Fig. 2. Scheme of the flow-calorimeter

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{\text{dys}} = \dot{I}(x_1) - \dot{I}(x_2) = \dot{m}_w \cdot c_w \cdot [\Theta(x_1) - \Theta(x_2)] = \dot{m}_w \cdot c_w \cdot \Delta\Theta \quad (12)$$

gdzie c_w ciepło właściwe medium [$J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$]. Jeśli warunki przepływu oraz własności medium w przekrojach x_1 i x_2 są takie same, to określając iloczyn $\dot{m}_w \cdot c_w$ jako stałą kalorymetru K wyrazimy strumień \dot{Q} jako funkcję różnicy temperatury $\Delta\Theta$, mianowicie

$$\dot{Q} = K \cdot \Delta\Theta \quad (13)$$

Można praktycznie zrównać temperaturę otoczenia z temperaturą medium na wejściu pomiarowym $\Theta(x_1)$. Ciepło tarcia powoduje przy odpowiednim wydatku cieczy kalorymetrycznej \dot{m}_w nieznaczny przyrost temperatury $\Delta\Theta$ rzędu 1[K], który sprawia, że kalorymetr będzie pracował w warunkach isoperibolicznych. Zaznaczy się więc rola oporu termicznego R_{th} . Przyjęcie jako medium wody destylowanej umożliwia zachowanie stałych jej własności fizycznych (gęstości, ciepła właściwego) w zakresie wartości parametrów charakteryzujących przepływ w kalorymetrze (zmiana ciśnienia na wlocie i wylocie, zmiana temperatury $\Delta\Theta$, stała prędkość przepływu, brak reakcji chemicznych i fizykochemicznych). Można więc uznać stałą kalorymetru za równą iloczynowi wydatku \dot{m}_w (te same przekroje na wlocie i wylocie cieczy kalorymetrycznej) i ciepła właściwego c_w . Aby jednak uwzględnić dodatkowe oddziaływania energetyczne (wymiana ciepła z otoczeniem, tarcie wewnętrzne cieczy) należy przeprowadzić kalibrację kalorymetru metodą elektryczną, stosując jako źródło ciepła o znanej mocy \dot{Q}_{el} np. grzałkę elektryczną. W ten sposób dla określonych wszystkich parametrów pracy kalorymetru wyznacza się jego stałą, mianowicie [L. 3].

$$K = \frac{\dot{Q}_{el}}{\Delta\Theta_{el}} \quad (14)$$

gdzie: $\Delta\Theta_{el}$ – różnica temperatury stwierdzona w przekrojach x_1 i x_2 na wskutek działania źródła ciepła o mocy \dot{Q}_{el} oraz występowania strat energii na rzecz otoczenia i tarcia wewnętrznego cieczy kalorymetrycznej oraz tarcia o próbki pracujące na biegu jałowym. Szczegółowy opis wykonania tribokalorymetru zamieszczono w pracy [L. 3].

Tabela 1. Składowe bilansu energetycznego ustalone podczas badań kalorymetrycznych procesu tarcia technicznie suchego stali normalizowanej gat. 45 [L. 3]

Tabela 1. Components of energetic balance determined as the result of calorimetric research of normalized steel 45 conducted in the condition of technically dry friction [L. 3]

Składowe bilansu	Średnia temperatura Θ [K]		
	287,26	297,64	308,14
Praca tarcia A [J]	5521,4	6324,64	8749,1
Ciepło tarcia Q_{dys} [J]	4308,9	4669,4	4898,1
Praca dyssypacji mechanicznej A_{dys} [J]	1212,5	1654,8	3850,3
Parametr η [%]	21,3	26,0	43,5

Tabela 2. Wyniki badań struktury oporów tarcia

Table 2. Research results of the structure of resistance to friction and tribological wear

Temperatura	Średnia siła tarcia	Średni współczynnik tarcia	Parametr	Część mechaniczna siły tarcia	Część cieplna siły tarcia	Mechaniczny współczynnik tarcia	Ciepły współczynnik tarcia	Średnie zużycie pary trącej
Θ [K]	T [N]	μ	η	T_m [N]	T_c [N]	μ_m	μ_c	Z [mg]
287,26	9,82	0,29	0,213	2,09	7,76	0,06	0,23	0,585
297,64	11,24	0,33	0,26	2,92	8,32	0,09	0,24	0,792
308,14	15,54	0,46	0,435	6,76	8,78	0,2	0,26	1,57

Przed przystąpieniem do badań bilansu energii ustalono eksperymentalnie stałą $K = 3,48 \text{ W} \times \text{K}^{-1}$. Elementy pary trącej miały postać cylindrów o wysokości 30 mm oraz średnicach: zewnętrznej równej 25 i wewnętrznej – równej 20 mm wykonanych z normalizowanej stali gat. 45. Tarcie ślizgowe, technicznie suche występowało między ich czołami z prędkością 0,344 m/s, pod obciążeniem normalnym równym 34 N w czasie 1638 s. Przed badaniami próbki zostały dotarte. Następnie stabilizowano temperaturę pomieszczenia ze stanowiskiem badawczym na założonym poziomie temperatury cieczy kalorymetrycznej. W badaniach ustalono trzy poziomy tej temperatury: 287,26; 297,64 i 308,14 K. Wyniki badań składowych bilansu energetycznego procesu tarcia dla przypadku pary trącej ze stali gat.45, będące średnimi z sześciu pomiarów, zestawiono w **Tabeli 1**. W **Tabeli 2** zilustrowano strukturę oporów tarcia i wartości zużycia tribologicznego zmierzonego za pomocą wagi analitycznej.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W niniejszej pracy wykazano, że podział oporów tarcia na część cieplną i mechaniczną (zużyciową) wynika bezpośrednio z równania pierwszej zasady termodynamiki fenomenologicznej dla systemów otwartych. Przeprowadzona analiza energetyczna procesu i natury oporów tarcia ukazuje ważny kierunek badań tribologicznych, gdzie szczególna rola przypada kalorymetrowi przepływowemu. Uzyskane informacje o strukturze bilansu energii, charakteryzującego tarcie i zużywanie ustabilizowane metali są pomocne przy ustalaniu struktury siły tarcia i współczynnika tarcia. Z przytoczonych analiz i badań wynikają następujące wnioski:

- o strukturze oporów tarcia ustabilizowanego metali (stali normalizowanej gat. 45) decyduje temperatura styku cieznego, a pośrednio proces chłodzenia pary trącej;
- ze wzrostem temperatury styku cieznego (od 287,26 do 308,14K) rośnie siła tarcia i współczynnik tarcia;
- ze wzrostem temperatury styku cieznego rośnie wartość parametru η , czyli składowa mechaniczna oporów tarcia;
- znacznemu przyrostowi współczynnika tarcia (od 0,29 do 0,46) i siły tarcia (od 9,82 do 15,54 N) ze wzrostem temperatury styku cieznego (od 287,26 do 308,14 K) towarzyszy niewielki przyrost części cieplnej współczynnika tarcia (od 0,23 do 0,26) i części cieplnej siły tarcia (od 7,76 do 8,78 N);
- dużej zmienności mechanicznej części współczynnika tarcia (od 0,06 do 0,2) i mechanicznej składowej siły tarcia (od 2,09 do 6,76N) w przyjętym zakresie temperatury odpowiada znaczny przyrost wartości zużycia (od 0,585 do 11,57 mg).

LITERATURA

1. Sadowski, J.: Osobliwości procesów termodynamicznych towarzyszących tarcia metali. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej 2001, Radom.
2. Sadowski, J.: Thermodynamische Theorie von Reibung und Verschleiß. Tribologie und Schmierungstechnik nr 6, 2002, s. 41–47.
3. Sarnowicz L.: Analiza procesu tarcia metali na podstawie badań kalorymetrycznych. Rozprawa doktorska. Wydział Mechaniczny, Politechnika Świętokrzyska w Kielcach. 1999.

Recenzent:
Marian SZCZEREK

Summary

Authors proved that friction resistance split into thermal and mechanical components directly results from the equation of the first thermodynamic principle for an open systems. The methods of this components assessment on the basis of calorimetric investigation of the friction and stable wear processes of steel 45 is proposed. The research results and a physical interpretation are presented.

Piotr SADOWSKI

**BADANIA MODELOWE ODPORNOŚCI
NA ZUŻYWANIE ŚCIERNE WYBRANYCH
GATUNKÓW STALIW**

**MODEL RESEARCH OF THE RESISTANCE TO ABRASIVE
WEAR OF THE CHOSEN KINDS OF CAST STEEL**

Słowa kluczowe:

Odporność na zużywanie, badania modelowe, zmodyfikowany tester, nowe staliwa

Keywords:

Resistance to wear, model research, modified tester, new cast steel

Streszczenie

W pracy zaproponowano metodykę badania odporności na zużywanie ścierne metali za pomocą specjalnie przystosowanego testera T-01M. Opisano badania modelowe tarcia i zużycia grupy trzech nowych staliw opracowanych w Politechnice Radomskiej. Ustalono ich odporność na zużywanie, podając jej interpretację energetyczną.

WPROWADZENIE

W Instytucie Budowy Maszyn Politechniki Radomskiej od wielu lat prowadzone są prace nad strukturą wewnętrzną konstrukcji. Pod tym pojęciem rozumie się najszerszej ujęte cechy tworzywa konstrukcyjnego. W szczególności zostały rozwinięte badania staliw, mające na celu optymalizację ich własności mechanicznych i eksploatacyjnych ze względu na skład i strukturę materiału. Duże znaczenie techniczne ma tu odporność materiału na zużywanie ściernie, zwłaszcza przewidzianego do pracy ośrodka o cechach ścierniwa (piach, skały).

Zagadnienie oceny odporności na zużywanie tribologiczne jest również przedmiotem wieloletnich analiz teoretycznych i eksperymentalnych prowadzonych w Zakładzie Podstaw konstrukcji Maszyn i Tribologii. Została tu opracowana oryginalna termodynamiczna interpretacja tarcia i towarzyszących mu procesów [1]. Wnioski wyprowadzone z tej interpretacji mają ogólne znaczenie i stanowią podstawę energetycznej oceny odporności na zużywanie.

W niniejszym opracowaniu przyjęto za cel zbadanie odporności na zużywanie ściernie grupy specjalnie skonstruowanych staliw [2] z uwzględnieniem energetycznych mierników tej odporności. Zakres prac obejmuje:

- Zaprojektowanie i wykonanie zmodyfikowanej głowicy badawczej testera T0-1M, przystosowanej do badania zużycia ściernego metali i bieżącego rejestrowania oporów i pracy tarcia.
- Skalowanie układów pomiarowo-rejestrujących zmodyfikowanego testera.
- Badania tarcia i zużycia odpowiednio wykonanych próbek trzech stali i wzorca – żelaza armco.
- Ocena odporności na zużywanie ściernie i interpretacja otrzymanych wyników badań.

OKREŚLENIE I MIARY ODPORNOŚCI NA ZUŻYWANIE

Odpornością na zużywanie tribologiczne nazywa się zdolność materiału do przeciwstawiania się zużyciu w określonych warunkach tarcia. Za miarę odporności na zużywanie tribologiczne przyjmuje się odwrotność wartości zużycia Z lub odwrotność intensywności zużycia J [L. 3]. Wartość zużycia wyraża się ubytkiem masy lub wymiaru liniowego próbki, natomiast stosunek tego zużycia do drogi tarcia jest intensywnością zuży-

cia (wagowego, liniowego). W pierwszym przypadku określa się średnią odporność J_{sr} następująco:

$$J_{\text{sr}} = \frac{1}{Z} \quad (1)$$

w drugim przypadku – chwilową wartość odporności na zużywanie tribologiczne J :

$$J = \frac{1}{J} \quad (2)$$

Zależnie od przyjętej miary zużycia lub intensywności zużywania mogą wystąpić różne miana odporności na zużywanie. Badania zużycia są często badaniami porównawczymi. W badaniach takich wyznacza się, w identycznych warunkach tarcia, intensywność zużywania lub odporność na zużywanie badanych materiałów i jakiegoś materiału przyjętego jako wzorec. W wyniku badań wyznacza się względną odporność na zużywanie J_{wz} [L. 4]:

$$J_{\text{wz}} = \frac{J_{\text{sr}}}{J_{\text{srw}}} \quad (3)$$

gdzie J_{srw} jest średnią odpornością na zużywanie materiału wzorca. Problem mian nie występuje w przypadku wprowadzenia względnej odporności na zużywanie. Znaczenie względnej odporności na zużywanie jest szczególnie istotne wówczas, gdy analizuje się ścieranie metali o materiały twarde (np. skały, piasek, tarcza ścierna), których zużycia się nie ocenia.

Oprócz omówionych powyżej, stosowane są również energetyczne miary odporności na zużywanie tribologiczne. Uwzględniają one zarówno wartość zużycia, jak i wartość pracy tarcia, która zużycie to spowodowała. Wielkością fizyczną, którą proponuje się w niniejszym referacie stosować przy ocenie odporności na zużywanie, jest praca właściwa zużycia e_{R}^x . Określa się ją stosunkiem pracy tarcia $A_{\text{t1-2}}$ i masy zużytego materiału Δm systemu tribologicznego, za który przyjmuje się układ dwóch trących się ciał stałych [L. 1]:

$$e_{\text{R}}^x = \frac{A_{\text{t1-2}}}{\Delta m} \quad (4)$$

Pracę właściwą zużycia wyraża się w dżulach na gram, pracę tarcia – w dżulach, a ubytek masy systemu w gramach.

Praca właściwa zużycia przypomina niektóre wielkości fizyczne takie, jak np. ciepło parowania [J/g], lub ciepło sublimacji [J/g], które są miarami energii (siły) wiązań molekularnych w cieczech i ciałach stałych. W każdym przypadku mamy tu do czynienia z wielkościami właściwymi (podobne cechy mają również gęstości energii, gdzie zdyssypowana energia podczas tarcia jest odnoszona do objętości zużytego materiału).

Ogólna postać zależności określającej pracę właściwą zużycia na podstawie równania pierwszej zasady termodynamiki fenomenologicznej dla systemów otwartych jest następująca [1]:

$$e_R^x = \frac{i}{1 - \frac{\Delta U}{A_{11-2}} - \frac{Q_{1-2}}{A_{11-2}}} \quad (5)$$

gdzie: Q_{1-2} – energia oddana do otoczenia na sposób ciepła [J]; ΔU – zmiana energii wewnętrznej systemu [J]; i – średnia entalpia właściwa produktów zużycia (między początkiem i końcem procesu) charakteryzująca mechanizm zużywania tribologicznego [J/g]; indeks 1-2 symbolizuje zmianę stanu systemu między początkiem i końcem procesu tarcia.

Analiza tego wzoru ujawnia złożoność pojęcia „odporność na zużycie”. Przede wszystkim nie można go przedstawiać jako cechy materiału. Jest to funkcja mechanizmu zużywania ilościowo scharakteryzowanego przez entalpię właściwą produktów zużycia „ i ”, pracy tarcia A_{11-2} , zmiany energii wewnętrznej systemu ΔU i ciepła Q_{1-2} . Ze wzoru (5) wynika także wniosek, że zachowanie identyczności procesów towarzyszących tarcu jest możliwe przy zachowaniu tych samych zmian ΔU , Q_{1-2} oraz mechanizmu zużywania „ i ” w każdym eksperymencie, co jest praktycznie bardzo trudne. Wyrażenie określające pracę właściwą zużycia (5) upraszcza się, jeżeli w systemie tribologicznym zachodzą procesy stacjonarne i przyjmuje postać następującą [L. 1]:

$$e_R^x = \frac{i}{1 - \frac{\dot{Q}}{\dot{A}}} = \frac{1}{-a + b \cdot \Theta} \quad (6)$$

gdzie: \dot{Q} – strumień cieplny płynący od systemu do otoczenia [W]; \dot{A} – moc tarcia [W]; a [g/J] i b [g/J · K] – stałe systemu tribologicznego; Θ – temperatura styku ciernego [K].

Wzór (6) informuje, że o wytrzymałości powierzchniowej przy ustabilizowanym tarcu decyduje struktura systemu tribologicznego (stałe a i b) oraz jego stan termodynamiczny – temperatura Θ . Nie grają tu roli parametry mechaniczne tarcia – nacisk i prędkość ślizgania. Wynika stąd, że temperatura jest niezależnym parametrem tarcia i powinna być w trakcie badań zadawana i stabilizowana. Należy tu zaznaczyć, że również entalpia właściwa produktów zużycia „i” ma podobne znaczenie fizyczne jak praca właściwa zużycia – jest mianowicie gęstością energii. Może być więc także przyjęta za miarę odporności na zużywanie. Aspekt praktyczny badań tribologicznych nakazuje jednak zrezygnowanie ze stosowania tej miary. Istnieje bowiem duża trudność towarzysząca wyznaczaniu wartości tej wielkości. Konieczne są tutaj badania kalorymetryczne procesu tarcia, ograniczone do przypadku tarcia i zużywania ustabilizowanego. W tej sytuacji praca właściwa zużycia jako wielkość łatwo dająca się wyznaczyć eksperymentalnie i mającą jasną interpretację fizyczną jest godną polecenia miarą odporności na zużywanie.

W niniejszej pracy zanalizowana będzie odporność na zużywanie tribologiczne wybranych materiałów na podstawie definicji określonych wzorami: (1), (3) i (4).

BADANIA ODPORNOŚCI NA ZUŻYWANIE TRIBOLOGICZNE

W celu zbadania wpływu składu chemicznego i twardości materiału na jego odporność na zużywanie ściernie należy zapewnić takie parametry i warunki tarcia, przy których zarówno pierwotna struktura i własności mechaniczne nie będą zmieniać się. Tym samym muszą być wykluczone, jako dominujące, mechanizmy zużywania utleniającego i adhezyjnego (I i II rodzaju). Można to osiągnąć przyjmując skojarzenie typu tarcza – trzpień, gdzie tarczą jest ściernica – trzpieniem natomiast cylindryczna próbka badanego materiału. Tarcza ścierna umożliwia odtwarzanie się stanu jej powierzchni w miarę wykruszania ziaren ścierniwa podczas badań. Ponadto materiał ścierny dobrze modeluje własności gleby (piasek, kamienie), w której pracują narzędzia metalowe.

Tester T0-1M z głowicą badawczą typu trzpień-tarcza umożliwia łatwe ustalenie: nacisku, prędkości poślizgu i drogi (czasu) tarcia. Jednocześnie mierzone są i rejestrowane: zmiany siły tarcia w czasie oraz bieżąca temperatura otoczenia (ok. 20°C). Wilgotność powietrza w pomieszczeniu laboratoryjnym wynosiła 50%. Ubytki masy trzpienia (pomiar różnicowy)

ustalano na wadze elektronicznej o dokładności $\pm 0,01\text{mg}$. W celu zrealizowania ściernego mechanizmu zużywania badanego materiału przyjęto następujące wartości parametrów tarcia: obciążenie normalne – 9,81 N, prędkość poślizgu 0,2 m/s, droga tarcia – 180m. Wartości te zapewniały mieralne zużycie próbki w stosunkowo krótkim czasie.

W celu przystosowania głowicy testera T0-1M do prowadzenia badań zużycia ściernego zamontowano na jego stoliku obrotowym tarczę ścierną o wymiarach $\phi 79/\phi 20-10$ oznaczoną symbolem: 95A54N6B (elektrokorund zwykły –95A, ziarno 54 – od 355 do 300 μm , twardość - N, struktura 6, spoiwo żywiczne sztuczne – B). Próbka ściernego materiału miała postać cylindra o średnicy 5 mm i wysokości 40 mm. Badano trzy staliwa stopowe, których skład i twardość podano w **tabeli 1** oraz rafinowane żelazo armco o twardości 115 HB jako wzorzec. Rafinacja polegała na przetopieniu żelaza armco w piecu próżniowym.

Tab. 1. Skład chemiczny i twardość materiału próbek [2]

Tab. 1. Chemical composition and hardness of samples material [2]

Nr próbki	C %	Mn %	Cr %	Mo %	Cu %	Ni %	Si %	V %	HRC
1	0,49	0,43	12,15	0,57	0,5	0,96	0,49	0,1	44
2	0,45	0,44	9,14	0,6	0,58	7,0	0,42	-	52
3	0,5	-	3,07	0,39	1,49	0,54	-	0,3	53

Na **Rysunku 1** pokazano widok ogólny zmodyfikowanego testera T-01M. W stosunku do oryginału – oprócz przebudowanej głowicy badawczej – zmieniono położenie czujnika siły tarcia. Czujnik został przesunięty w kierunku osi obrotu dźwigni służącej do pomiaru siły tarcia. W ten sposób zwiększono trzykrotnie przełożenie w układzie pomiaru siły tarcia i ustalono punkt pracy czujnika w zakresie, gdzie jego charakterystyka jest liniowa. Następnie dokonano skalowania zmodyfikowanego układu pomiarowego siły tarcia [**L. 5**].

Badania tarcia, zużywania oraz odporności na zużywanie ściernie przeprowadzono na zmodyfikowanym testerze T-01M, przyjmując dla każdego materiału próbki te same parametry doświadczenia. Liczba doświadczeń z poszczególnymi próbkami zawierała się od 8 do 10. Wyniki badań zamieszczono w **Tabeli 2**, gdzie uwzględniono tylko 6 ostatnich wyników uzyskanych w poszczególnych seriach (chodziło o wyeliminowanie z analiz procesu docierania próbki i ściernicy). Podczas badań rejestrowano prze-



Rys. 1. Widok zmodyfikowanego testera T-01M, przystosowanego do badania zużycia ściernego metali [5]

Fig. 1. The modified tester T-01 M, adopted to abrasive wear of metal research [5]

Tab. 2. Wyniki badań odporności na zużycie tribologiczne

Tab. 2. Research of the resistance to tribological wear results

L.p.	Odporność J_{sr1} [1/mg]	Praca właściwa e_{R1}^x [kJ/g]	Odporność J_{sr2} [1/mg]	Praca właściwa e_{R2}^x [kJ/g]	Odporność J_{sr3} [1/mg]	Praca właściwa e_{R3}^x [kJ/g]	Odporność J_{srw} [1/mg]	Praca właściwa e_{Rw}^x [kJ/g]
	Próbka 1		Próbka 2		Próbka 3		Próbka żelazo-armco	
1	0,203666	126,538	0,154799	97,1390	0,283286	212,478	0,004893	5,607
2	0,177936	108,193	0,175439	107,307	0,228833	175,494	0,005459	6,576
3	0,196464	116,877	0,162602	104,450	0,270270	213,060	0,004989	6,710
4	0,173010	103,875	0,177936	107,425	0,280112	218,927	0,004598	6,717
5	0,200803	107,480	0,184502	117,526	0,294118	238,414	0,004622	6,880
6	0,205339	98,9010	0,193424	125,576	0,268817	205,790	0,004348	6,417
Miary statystyczne								
Średnia	0,19287	110,3107	0,174783	109,9038	0,270906	210,6938	0,004818	6,4845
Odchylenie standardowe	0,013895	9,904934	0,014143	10,09245	0,022591	20,53315	0,000388	0,457004
Poziom ufności (95,0%)	0,014582	10,39457	0,014842	10,59136	0,023707	21,54818	0,000407	0,479595

bieg siły tarcia w czasie. Był on podstawą oceny pracy tarcia. Wyznaczona praca tarcia i wartości zużycia tribologicznego próbek posłużyły do opracowania wielkości statystycznych, charakteryzujących odporność na zużycie za pomocą programu Excel.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W **Tabeli 2** zestawiono wyniki uzyskane w poszczególnych seriach badań odporności na zużywanie ściernie oraz miary statystyczne. Ustalono odporności na zużywanie J_{sr} poszczególnych materiałów oraz ich prace właściwe zużycia e_R^x . Na tej podstawie można ocenić względną odporność na zużywanie poszczególnych materiałów użytych na próbki. Przyjmując jako materiał bazowy ten, który wykazał najmniejszą odporność, czyli żelazo armco, można wyznaczyć następujące odporności względne na zużywanie:

Przez analogię do odporności względnej J_{wz} można wprowadzić odpowiednie stosunki prac właściwych zużycia i ustalić wartości względnej odporności na zużywanie e_{wz}^x . Dla przypadku przeprowadzonych badań są to następujące wartości:

Odniesienie otrzymanych rezultatów do wybranych, podstawowych własności fizycznych materiału bazowego użytych próbek – żelaza jest możliwe dzięki energetycznej interpretacji odporności na zużywanie za pomocą pracy właściwej e_R^x . Zauważamy mianowicie, że ciepło parowania żelaza $r_{Fe} = 6,364$ kJ/g. Jest to wartość zbliżona do pracy właściwej zużycia żelaza armco e_{Rw}^x , która wyniosła 6,4845 kJ/g. Można zatem rozważyć przyjęcie tej wartości jako wzorcowej w badaniach względnej odporności stali na zużywanie tribologiczne zinterpretowanej energetycznie. Można również wyrażać pracę właściwą zużycia ściernego stali jako funkcję ciepła parowania żelaza. W przypadku uzyskanych wyników badań w niniejszej pracy są to następujące zależności: $e_{R1}^x = 17,334 r_{Fe}$; $e_{R2}^x = 17,269 r_{Fe}$; $e_{R3}^x = 33,107 r_{Fe}$; $e_{Rw}^x = 1,019 r_{Fe}$.

Uzyskane rezultaty badań przedstawione w niniejszym opracowaniu pozwalają stwierdzić, co następuje:

- Tester T-01M można, po odpowiedniej modyfikacji, przystosować do badań zużywania ściernego materiałów, tym samym – poszerzyć zakres jego wykorzystania.
- Względna odporność na zużywanie tribologiczne wyrażona jako stosunek odwrotności wartości zużycia różni się istotnie od względnej odporności na zużywanie wyrażonej stosunkiem prac właściwych zużycia.
- Skład chemiczny staliwa jest czynnikiem warunkującym odporność na zużywanie tribologiczne, przy czym jego twardość nie świadczy jednoznacznie o tej odporności.
- Wyrażenie odporności na zużywanie stali i żelaza armco za pomocą pracy właściwej zużycia daje podstawy do powiązania jej z ciepłem parowania żelaza.
- Praca właściwa zużycia, jako energetyczna miara odporności na zużywanie, uwzględniająca obok zużycia również nakład energii powodujący je, powinna być przedmiotem dalszych analiz i interpretacji. Ocena tej odporności powinna być odnoszona względem podstawowych struktur układu żelazo – węgiel: ferrytu, perlitu i cementytu.

LITERATURA

1. Sadowski, J.: Osobliwości procesów termodynamicznych towarzyszących tarcia metali. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej 2001, Radom.
2. Wojtkun F.: Staliwo odporne na ścieranie, zwłaszcza w podwyższonych temperaturach. Świadcstwo Autorskie Nr 27889 UP RP z dn. 25 listopada 1992.
3. Lawrowski Z.: Tribologia. Warszawa, PWN 1993.
4. Solski P., Ziemia S.: Zagadnienia zużycia elementów maszyn spowodowanego tarcia. Warszawa, PWN 1969.
5. Sadowski P.: Badania odporności na zużywanie ściernie wybranych gatunków staliw. Sprawozdanie z badań własnych; IBM, Politechnika Radomska 2002 r.

Recenzent:
Marian SZCZEREK

Summary

The paper presents the method of a resistance to wear investigation with the use of specially adopted tester T-01 M. The model research of friction and wear of three new cast steel, which were elaborated in Radom Technical University, are described. Theirs resistances to wear were evaluated. The energetic interpretation of resistance is presented.

SENATORSKI J., SIEPRACKA B.

**ZAPOBIEGANIE TRIBOKOROZJI
PRZEZ OBRÓBKĘ CIEPLNO-CHEMICZNĄ**

**PREVENTION AGAINST TRIBOCORROSION THROUGHOUT
THERMO-CHEMICAL TREATMENT**

Słowa kluczowe:

warstwa dyfuzyjna, tarcie, zużycie, korozja

Key – words:

diffusion layers, friction, wear, corrosion

Strzeszczenie:

W referacie podano propozycję podziału laboratoryjnych badań korozyjno-tribologicznych. Propozycja ta przewiduje podział tych badań na dwie grupy: oddzielne badania korozyjne i tribologiczne oraz łączne badania korozyjno-tribologiczne. W tych ostatnich wyodrębniono dwie metody badań: niejednoczesne oraz jednoczesne. Ze względu na częstotliwość występowania narażeń badania niejednoczesne można podzielić na: pojedyncze, cykliczne i ciągłe.

Omówiono wyniki badań, wg opracowanych metod, stali ulepszanych cieplnie, a także stali z wytworzoną dyfuzyjną warstwą chromowaną i dyfuzyjną warstwą azotowaną.

WPROWADZENIE

Na pracujące części maszyn i narzędzia oddziałuje otoczenie w różny sposób i z różnym natężeniem. Oddziaływanie to odbywa się przez stykanie się z innym ciałem stałym i zwykle wtedy przekazywane są obciążenia (siły, naciski), z ciałem ciekłym (np. ośrodkiem smarującym) lub gazowym (np.: otaczającą atmosferą) i wtedy ośrodki mogą oddziaływać chemicznie. Często występuje powiązanie oddziaływań.

Każde oddziaływanie niesie niebezpieczeństwo zmiany stanu fizykochemicznego części maszyny lub narzędzia, przejawiającego się zmianą właściwości, i dlatego nosi nazwę narażeń.

Pracujące części maszyn i narzędzia podlegają narażeniom w postaci obciążeń statycznych i dynamicznych (w tym okresowo zmiennych, czyli zmęczeniowych), oddziaływania chemicznego i elektrochemicznego ośrodka ciekłego lub gazowego (korozji), tarcia, działania wysokich lub niskich temperatur, pól elektrycznych, elektrostatycznych, magnetycznych, ultradźwięków, promieniowania elektromagnetycznego o różnych częstotliwościach (radiowego, podczerwonego, widzialnego, nadfioletowego, X, Y), grawitacji ziemskiej i innych czynników, zwykle szkodliwie – ale niekiedy korzystnie wpływających na pracę i współpracę z innymi elementami, i zwykle obniżających ich właściwości użytkowe, zwłaszcza trwałość eksploatacyjną (**Rys. 1**).

Laboratoryjne badania właściwości użytkowych	=	Przedmiot badań: próbka	+	Narażenia	korozyjne - K tribologiczne - T mechaniczne - M inne - J
--	---	-------------------------	---	-----------	---

Rys. 1. Idea laboratoryjnych badań właściwości użytkowych materiałów

Fig. 1. Idea of the laboratory testing of operational properties of materials

Spośród ww narażeń najsilniejszy wpływ na zmianę właściwości użytkowych wywierają narażenia: korozyjne, tribologiczne i mechaniczne (przy najczęściej występujących narażeniach zmęczeniowych). Narażenia te tylko wyjątkowo występują pojedynczo; rzadko zdarza się, aby pracujący ele-

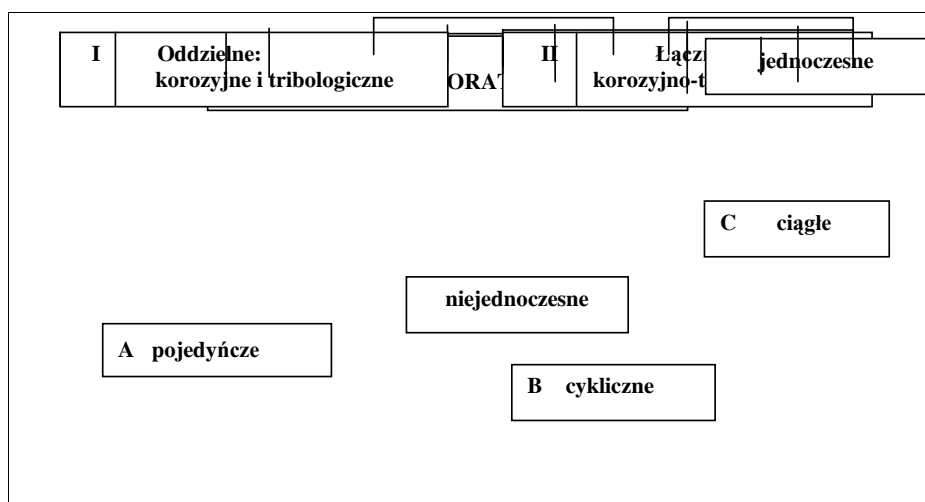
ment podlegał działaniu tylko jednego narażenia. Zwykle podlega jednoczesnemu działaniu kilku narażeń, przy czym jedno z nich lub dwa są narażeniami dominującymi.

W prawidłowo prowadzonych, konsekwentnych i kompleksowych badaniach laboratoryjnych przedmiot badań powinien podlegać wszystkim lub najważniejszym badaniom uwzględniającym wpływ ww. lub dominujących narażeń na właściwości użytkowe. Badania te powinny zostać przeprowadzone przed oddaniem przedmiotu lub jego elementów, w tym materiałów użytkowanych do jego budowy, do eksploatacji. Badania laboratoryjne właściwości użytkowych pozwalają na określenie właściwości, jakie przedmioty, elementy lub materiały będą prawdopodobnie wykazywały w czasie eksploatacji przy różnych narażeniach; badania stanowiskowe (stendowe) właściwości użytkowych są bliższe rzeczywistości, zaś najbliższe – są badania eksploatacyjne.

Warunki przeprowadzania badań laboratoryjnych powinny być jak najbardziej zbliżone do przewidywanych rzeczywistych warunków pracy badanych materiałów czy elementów.

Zatem wszystkie laboratoryjne badania właściwości użytkowych materiałów i elementów powinny zmierzać do jak najwierniejszego odtworzenia przewidywanych warunków eksploatacyjnych.

Laboratoryjne badania wpływu narażeń korozyjnych i tribologicznych na zużycie można podzielić na dwie grupy [L. 1] (**Rys. 2.**)



Rys. 2. Podział laboratoryjnych badań zużycia korozyjnego i tribologicznego

Fig. 2. Division of the laboratory testing of corrosive and tribological wear

I. Oddzielne badania korozyjne i tribologiczne realizowane wg odrębnych procedur badawczych obowiązujących w badaniach korozyjnych i w tribologii, przy wykorzystaniu typowych dla tych badań próbek i parametrów badań, uwzględniających rodzaje narażeń (np.: rodzaj współpracy tribologicznej, rodzaj środowiska korozyjnego) i intensywność ich oddziaływania (np.: nacisk, stężenie środowiska korozyjnego) oraz zmienność występowania narażenia ich w czasie.

II. Łączne badania korozyjno-tribologiczne, które można podzielić na 2 grupy:

– niejednoczesne, w których ten sam badany materiał podlega niejednoczesnym narażeniom korozyjnym i tribologicznym; zwykle występuje kolejność narażeń jw., tzn. badaniom tribologicznym poddawany jest materiał skorodowany, ale badania mogą również przebiegać w odwrotnej kolejności, jednak ten przypadek występuje rzadziej.

– jednoczesne, w których ten sam materiał badany podlega jednoczesnemu badaniu zużycia tribologicznego w obecności medium korozyjnego; zwykle badaniu podlega materiał uprzednio nie skorodowany lub uprzednio nie poddawany próbom tribologicznym, ale przypadków tych wykluczyć nie można.

Ze względu na częstotliwość występowania narażeń badania niejednoczesne można podzielić na:

– *pojedyncze* (metoda A), polegające na jednokrotnym badaniu tribologicznym materiału uprzednio poddanego narażeniom korozyjnym. Narażenia korozyjne i tribologiczne mogą trwać w różnych okresach czasu. Próbki do badań - to próbki do dowolnych badań tribologicznych. Parametry badań powinny być różne, zmienne w określonych przedziałach. Badania te symulują warunki współpracy tarciowej elementów skorodowanych i mogą dotyczyć np. materiałów węzłów tarcia skorodowanych w czasie długotrwałego postoju w atmosferze korozyjnej przed rozpoczęciem eksploatacji.

– *cykliczne* (metoda B), będące bądź badaniami niejednoczesnymi, bądź jednoczesnymi.

W przypadku niejednoczesnych badań cyklicznych powtarzające się próby tarciove są przerywane okresowym działaniem środowiska korozyjnego, w przypadku jednoczesnych badań cyklicznych – w czasie każdego cyklu występuje jednoczesne oddziaływanie korozji i tarcia, zaś cykle są rozdzielone przerwami i oddziaływaniem środowiska korozyjnego. Wielokrotność cykli może być dowolna, sugeruje się jednak, aby nie było

ich więcej niż kilkanaście. Ich ostateczna liczba jest uzależniona od budowy strukturalnej pracujących warstw powierzchniowych (różnych stref i ich liczby), a ściślej - od jednorodności strukturalnej materiału próbki. Większa różnorodność strukturalna i większa głębokość zalegania odmiennych struktur wymaga większej liczby cykli badań. Próbki do badań mogą nie odbiegać od stosowanych w metodzie A. Parametry badań mogą być różne, ale powinny być takie same we wszystkich cyklach narażeń. Czasy oddziaływania korozyjnego - różne, czasy badań tribologicznych - również. Badania te symulują okresową współpracę tarciovą elementów częściowo skorodowanych, występującą w materiałach węzłów tribologicznych okresowego działania. Przy tym okresie może być rok, miesiąc, dzień, kilka godzin lub minut. Niejednoczesne badania cykliczne dobrze symulują pracę maszyn rolniczych lub maszyn przemysłu rolno-spożywczego, które na ogół pracują okresowo: długi czas korozji - krótki czas zużycia tribologicznego (np. kampania żniwna, kampania buraczana), podobnie jak maszyny budowlane lub drogowe pracujące zwykle w dzień. Jednoczesne badania cykliczne symulują pracę węzłów tarcia w maszynach górniczych, w niektórych budowlanych, niektórych obrabiarkach, elementach ciernych układów hamulcowych, sprzęgieł, zabieraków prądowych itp.

Ciągle (metoda C), w których próbka jest jednocześnie poddawana narażeniom tribologicznym i korozyjnym. Powinno się stosować próbki typowe dla badań tribologicznych. Intensywność narażeń może być różna, ale zwykle jednakowa w czasie jednej długotrwałej próby. Zwykle intensywność narażeń korozyjnych jest niezbyt wysoka i maksymalnie zbliżona do wartości narażeń rzeczywistych występujących podczas eksploatacji. Badania te symulują najczęściej występujące przypadki narażeń eksploatacyjnych części maszyn i narzędzi w tarciovych węzłach ślizgowych i skrawaniowych.

W zakresie tak zdefiniowanych badań tribokorozji ciągle odczuwalny jest niedostatek danych eksperymentalnych. [L. 2, 3, 4, 5]. Tę lukę stara się po części wypełnić prezentowana praca.

MATERIAŁY I METODYKA BADAŃ

W laboratoryjnych próbach odporności tribokorozyjnych materiałów zastosowano zróżnicowane układy trące. Dla określonych systemów trących wybrano następujące materiały:

- układ tarcia czołowego typu: płytka-pierścień stanowiły; płytka o wymiarach $\phi 30 \times 5$ mm, wykonana ze stali 45 chromowanej dyfuzyjnie

lub azotowanej dyfuzyjnie i pierścien z płaską powierzchnią roboczą o wymiarach $\phi 15/13$ mm, wykonany ze stali 45 obrobionej cieplnie do twardości ok. 57 HRC,

- układ trący typu: krążek-płytkę wykonany; krążek – $\phi 40 \times 10$ mm ze stali 40H ulepszonej do twardości 35 HRC względnie chromowanej lub azotowanej dyfuzyjnie i płytkę $30 \times 10 \times 4$ mm ze stali 40HM ulepszonej do twardości 38 HRC lub chromowanej lub azotowanej dyfuzyjnie.

Przy badaniach tribokorozji zastosowano następującą metodykę badawczą:

Metoda A. Próby tarcia poprzedzone intensywnym działaniem czynnika korozyjnego. Metodyka próby, opisana szerzej w pracy [6], obejmowała:

- poddanie próbek procesowi poprzedzającej korozji w komorze solnej (5% roztwór wodny NaCl, temperatura 35°C) w czasie 48 h;

próby tarcia czołowego z zastosowaniem maszyny typu I-47-K-54 przy następujących parametrach:

- średnia prędkość tarcia, $v = 0,42$ m/s,
- stały nacisk jednostkowy, $p = 5$ MPa,
- czas próby $t = 16$ h,
- środek chłodząco-smarujący, woda + Emulkol EKO, obj. 10:1,
- środek ścierny - elektrokorund, frakcja ziarn 120/99 mm,
- sposób pomiaru zużycia - profilografometryczny pomiar zużycia liniowego z dokładnością 1 mm, w odstępach czasu 1 h.

Metoda C. Próby tarcia w warunkach stałego kontaktu powierzchni trącej z czynnikiem korozyjnym wykonano na maszynie typu A-135 Am-slera, przyjmując następujące parametry:

prędkość obrotowa krążkowej przeciwpróbki, $n = 200$ obr./min,

średnia prędkość tarcia, $v = 0,42$ m/s,

obciążenie układu trącego, $P = 25$ daN,

czas tarcia, $t = \text{ok. } 2$ h,

środek korozyjny – 50% roztwór wodny soli fizjologicznej podawany kroplowo z wydatkiem – 60 kropli/min,

sposób pomiaru zużycia – mikroskopowy pomiar zużycia liniowego, z dokładnością 5 μm , w odstępach czasu – 0,5 h.

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Wyniki badań łącznego oddziaływania tarcia i korozji ilustrują wykresy przebiegu zużycia liniowego w funkcji czasu zamieszczone na **Rys. 3 i 4**. W **Tabeli 1** zestawiono podstawowe wskaźniki charakteryzujące próbę, tj.

całkowite zużycie liniowe próbki, intensywność zużycia liniowego, wskaźnik odporności na zużycie oraz współczynnik tarcia.

Wykresy przedstawione na **Rys. 3** i dotyczą wyników prób tarcia poprzedzonych intensywnym działaniem czynnika korozyjnego (metoda A), zaś widoczne na **Rys. 4** – próby tarcia w warunkach stałego kontaktu powierzchni trących z czynnikiem korozyjnym (metoda C).

Tabela 1. Wyniki badań tribokorozji

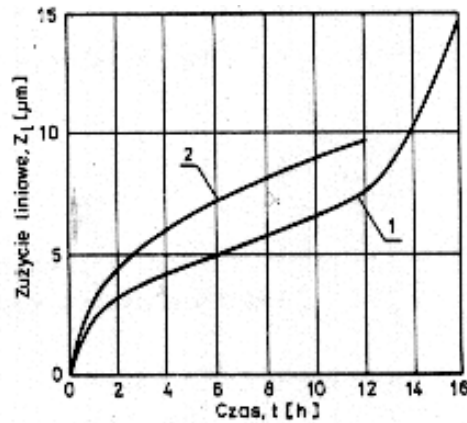
Table 1. Results of tribocorrosion investigations

Badany materiał		Metoda badań	Całkowite zużycie liniowe próbki Z_{lp} [mm]	Intensywność zużycia liniowego I_{lp} [mm/h]	Odporność na zużycie R_{lp} [h/mm]	Współczynnik tarcia μ
Płytkę stal 45 chromowana dyfuzyjnie	Pierścień - ulepszona stal 45	A	0,014	0,0009	1143	–
Płytkę - stal 45 azotowana dyfuzyjnie	Pierścień - ulepszona stal 45	A	0,010	0,0008	1200	–
Płytkę – ulepszona stal 40HM	Krażek – ulepszona stal 40H	C	0,220	0,15	6,8	0,28
Płytkę – stal 40HM chromowana dyfuzyjnie	Krażek – stal 40H chromowana dyfuzyjnie	C	0,024	0,024	41,7	0,18
Płytkę – stal 40HM azotowana dyfuzyjnie	Krażek – stal 40H azotowana dyfuzyjnie	C	0,172	0,069	14,5	0,28

Charakterystyki tribologiczne podane na **Rys. 3** dotyczą współpracy, przy tarcu czołowym, stali 45 chromowanej lub azotowanej dyfuzyjnie ze stalą 45 ulepszoną cieplnie. Współpracę tę poprzedziło oddziaływanie czynnika korozyjnego na materiały próbek, tzn. stal 45 chromowaną oraz azotowaną dyfuzyjnie. Obserwacja efektu oddziaływania czynnika korozyjnego na próbkę chromowaną pozwoliła stwierdzić, że w obszarze jej liczne, bardzo drobne, czarne punkty korozji rozmieszczone równomiernie na całej powierzchni próbki, zajmujące około 40% powierzchni całkowitej. Nato-

miast w przypadku próbki azotowanej korozja wystąpiła na krawędziach próbki na całym jej obwodzie. Ponadto wykryto dwa ogniska korozji, zajmujące ok. 2% powierzchni próbki.

Wyniki prób tarcia czołowego zilustrowane na **Rys. 3**, a także podane w **Tab. 1**, wskazują na wysoką odporność na zużycie warstwy chromowanej. Po okresie docierania, wynoszącym ok. 3 h, wykazuje ona bardzo małą intensywność zużywania zwiększającą się dopiero wraz z przechodzeniem procesu zużywania w materiał podłoża, co nastąpiło po ok. 13 h procesu tarcia. Natomiast nieco mniejszą odporność na zużycie w tych warunkach wykazała warstwa azotowana.

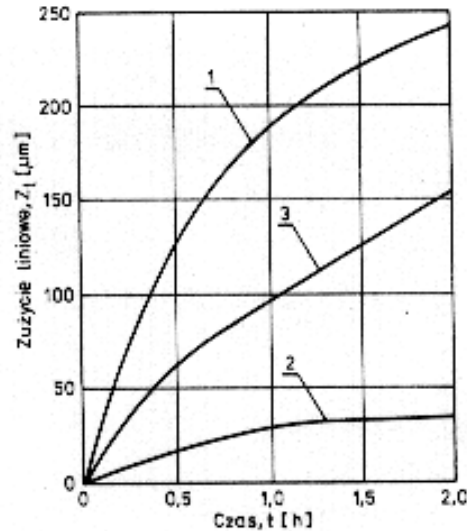


Rys. 3. Przebieg zużycia w funkcji czasu tarcia stali chromowanej (1) i azotowanej (2) dyfuzyjnie, poddanej procesowi korozji poprzedzającej (metoda A)

Fig. 3. Run of wear vs. friction time-of diffusion chromised (1) and nitrided (2) steels, after previous corrosion process (A method)

Wykresy podane na **Rys. 4** ilustrują przebieg zużycia materiałów w warunkach ciągłego doprowadzania czynnika korozyjnego do zespołu trącego. Wykresy te dotyczą współpracy stali 40HM i 40H ulepszonych cieplnie oraz współpracy tych samych stali po chromowaniu lub azotowaniu dyfuzyjnym. Z porównania wykresów zamieszczonych na **Rys. 4** oraz danych zamieszczonych w **Tab. 1**, wynika wyraźnie najwyższa odporność na zużycie, przy tarcu w obecności środka korozyjnego, stali z warstwą chromowaną. Również współczynnik tarcia stali z warstwą dyfuzyjną był najmniejszy. Trudno natomiast jest porównywać wyniki badań uzyskane według zróżnicowanych metod, tzn. metody A i C. Pomimo bowiem zastosowania podobnej prędkości tarcia, tzn. 0,42 m/s, układy trące obu stano-

wisk badawczych są bardzo zróżnicowane m.in. z uwagi na wywierane naciski jednostkowe. Układ tarcia czołowego zainstalowany na maszynie I-47-K-54 pracował bowiem w warunkach styku rozłożonego, zaś na maszynie A-135 Amslera – w warunkach styku skoncentrowanego.



Rys. 4. Przebieg zużycia stali ulepszonej cieplnie (1) chromowanej (2) oraz azotowanej (3) dyfuzyjnie narażonej na łączne oddziaływanie tarcia i korozji (metoda C)

Fig. 4. Run of wear of toughened (1), diffusion chromised (2) and nitrided (3) steels subjected to the friction and corrosion action (C method)

Różnice metodyczne związane z przebiegiem próby tarcia są na tyle istotne, iż praktycznie uniemożliwiają porównanie łącznego oddziaływania tarcia i korozji. Z przeglądu literaturowego i własnych doświadczeń wynika jednak, iż w przyszłości należy preferować badania tarcia przy stałej obecności czynnika korozyjnego, jako badania, które łatwiej można weryfikować próbami eksploatacyjnymi.

PODSUMOWANIE

Efektom metodycznych prac są opracowane i opisane w referacie dwa sposoby badań tribokorozji. Pierwszy z nich polega na prowadzeniu prób zużycia w cyklu poprzedzonym jednorazowym oddziaływaniem czynnika

korozyjnego zaś drugi - realizacji prób tarcia przy ciągłej obecności czynnika korozyjnego, wg opracowanych metod. Stale z wytworzoną dyfuzyjną warstwą chromowaną wykazały najkorzystniejsze właściwości tribokorozyjne.

LITERATURA

1. Senatorski J.: Ocena własności warstw dyfuzyjnych w warunkach narażeń tribologiczno-korozyjnych "Tribologia", nr 3, 2001, s. 403-411.
2. Senatorski J., Tacikowski J., Iwanów I.: Impregnowanie warstw azotowanych zwiększających odporność na zużycie przez tarcie i korozję. "Inżynieria Materialowa", nr 6, 2000, s. 427-429.
3. Denis R., Subramanian C., Yellup I.: Three body abrasive wear of composite coatings in dry and wet environments. *Wear*, 1998, t. 214, nr I. S. 112-130.
4. Nadolny K., Zwierzycki W.: Ocena tribotechnicznych właściwości wodnych roztworów sacharozy. "Tribologia" nr 3, 1997, s. 287-298.
5. Kuksenova L., Lapteva V.: Medotika inspytanij materialov na iznosostojkost i antifrikcionnost pri smazyvanii wodoj s abrazivom i solju. Sprawozdanie z pracy IMAS - Moskwa, 1998.
6. Boldok Z., Senatorski J., Iwanow J., Szczygieł J.: Opracowanie metodyki badań własności wybranych technologicznych warstw wierzchnich w warunkach narażeń korozyjnych i tribologicznych. Sprawozdanie z pracy IMP, zlec. nr 12.3.01.063.1, 1999.

Recenzent:
Janusz JANECKI

Summary

Division proposal of the laboratory corrosion-tribological investigations is presented. According to this proposal investigations are divided into two groups: separate corrosion and tribological testing and joint corrosion-tribological testing. In this second group two investigation methods are to distinguish: simultaneous and non-simultaneous ones. According to the frequency of hazards occurrence the non-simultaneous investigations can be divided into single, cyclic and contentions testing. In this paper the results of investigations, after elaborated methods, of toughened steels and steels with formed chromium diffusion layers nitrided diffusion layers are presented.