

Marian GRĄDKOWSKI*, **Anna MATUSZEWSKA****,
Monika MAKOWSKA*

ZMIANY SKŁADU CHEMICZNEGO POWIERZCHNI STALI PODCZAS TARCIA

CHANGES IN THE CHEMICAL COMPOSITION OF A STEEL SURFACE DURING FRICTION

Słowa kluczowe:

tarcie, smarowanie, dodatki smarne, zacieranie, powierzchnia tarcia

Key words:

friction, lubrication, lubricating additives, scuffing, friction surface

Streszczenie

Za pomocą aparatu czterokulowego, w którym obciążenie węzła tarcia przyrasta liniowo, wyznaczano wielkość obciążenia zacierającego stalowych węzłów tarcia, smarowanych mineralnym olejem podstawowym SAE 30/95, zawierającym dodatki smarne typu AW/EP, charakteryzujące się różnym udziałem pierwiastków, uznawanych za aktywne tribologicznie, tj. siarki i fosforu. Biegi testowe przerywano przy różnych obciążeniach (P), ustalonych dla badanej kompozycji na podstawie wartości ob-

* Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, ul. K. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom.

** Przemysłowy Instytut Motoryzacji, ul. Jagiellońska 55, 03-301 Warszawa.

ciężenia zacierającego (P_t), tj.: $P = P_t$, $P = P_t - 400 \text{ N}$, $P = P_t + 400 \text{ N}$. Następnie, za pomocą mikrospektrofotometrii w podczerwieni (FTIRM) oraz mikroanalizy rentgenowskiej (SEM/EDS), szczegółowo zbadano skład chemiczny powierzchni tarcia. Stwierdzono, że jeszcze przed przetrwaniem warstwy smarowej ($P = P_t - 400 \text{ N}$) na powierzchni stali, w obrębie kontaktu, powstają stałe produkty przemiany składników środka smarowego. Analiza FTIRM wykazała, że są to substancje organiczne, powstałe w wyniku tribochemicznych przemian (przede wszystkim utleniania) składników środka smarowego. Nie stwierdzono natomiast obecności produktów organicznych na powierzchniach tarcia, gdy testy przerywano przy obciążeniu zacierającym lub wyższym. W tych przypadkach następowała przebudowa struktury chemicznej powierzchni tarcia, polegająca na zmianie zawartości tlenu, węgla oraz pierwiastków aktywnych, pochodzących z dodatków smarnych. Ich zawartość na powierzchni tarcia wzrastała, chociaż nie wprost proporcjonalnie, wraz ze wzrostem stężenia dodatku w oleju i obciążenia węgla tarcia.

WPROWADZENIE

Kształtowanie niezawodności węzłów tarcia odbywa się na drodze doboru materiałów konstrukcyjnych, obróbki ich powierzchni (warstwy wierzchniej) oraz doboru materiałów smarowych. W związku z tym, iż brak jest jednoznacznych podstaw teoretycznych dobierania składników systemu tribologicznego do określonych warunków pracy węzła tarcia, działania te muszą być realizowane metodą kolejnych przybliżeń. Jest to proces czasochłonny i kosztowny, a jego wynik jest trudny do przewidzenia. W warunkach eksploatacji można przyjąć, że chwilowe właściwości materiału konstrukcyjnego i środka smarowego są ustalone. Ciągłym przemianom w obrębie styku tarciovego podlega jednak warstwa wierzchnia. Oznacza to, że chwilowe właściwości systemu tribologicznego determinowane są właściwościami warstwy wierzchniej, ponieważ w jej obrębie zachodzą kluczowe zjawiska i procesy, towarzyszące zużyciu i zacieraniu.

W technice, właściwości warstwy wierzchniej kształtowane są na etapie wytwarzania elementów maszyn [L. 1–3]. Mniejszą uwagę przywiązuje się do możliwości celowego ich zmieniania w trakcie eksploatacji [L. 4–7]. Charakter tych oddziaływań w znacznej mierze zależy od struktury warstwy granicznej, która z kolei jest determinowana składem

chemicznym środka smarowego. Cząsteczki polarne ulegają w tej warstwie uporządkowaniu, a często także fizycznemu lub chemicznemu związaniu z powierzchnią [L. 8]. Na powierzchni tarcia zachodzą złożone procesy tribochemiczne, w wyniku których zmieniają się właściwości systemu tribologicznego. Kluczową rolę w przebiegu tych procesów odgrywa charakter chemiczny materiału elementów trących i środka smarowego. Determinują one mechanizmy procesów tribochemicznych, kształtujących właściwości warstwy wierzchniej w fazie eksploatacji [L. 9–11].

Celem pracy było zbadanie składu chemicznego roboczych powierzchni wężła tarcia po testach tribologicznych z udziałem kompozycji smarowych na bazie oleju podstawowego SAE 30/95 i wybranych dodatków typu AW/EP.

OBIEKTY I METODY BADAŃ

Do mineralnego oleju podstawowego SAE 30/95, którego wybrane właściwości przedstawiono w **Tab. 1**, wprowadzono zaplanowane ilości (0,5÷7,5% wag.) wybranych komercyjnych pakietów dodatków o działaniu AW/EP (ok. 50-procentowe roztwory substancji aktywnych w oleju podstawowym). Zastosowano dwa pakiety, które oznaczono symbolami przedstawionymi w **Tab. 2**. Oba pakiety, bazujące na siarkowo-fosforowych związkach organicznych, wybrano ze względu na istotną różnicę zawartości w nich pierwiastków aktywnych triologicznie, tj. siarki i fosforu.

Tabela 1. Charakterystyka mineralnego oleju podstawowego SAE 30/95

Table 1. SAE 30/95 mineral basic oil characteristic

Lp.	Parametr	Wartość
1	Lepkość kinematyczna w temp. 40°C, [mm/s ²]	78,7
2	Lepkość kinematyczna w temp. 100°C, [mm/s ²]	9,97
3	Wskaźnik lepkości	107
4	Obciążenie zacierające, P _t , [N]	1200±100

Tabela 2. Skład elementarny (wg danych producentów) i umowne symbole zastosowanych pakietów dodatków AW/EP

Table 2. Elementary composition (according to the producer's information) and conventional symbols of used AW/EP additives

Symbol pakietu/dodatku	Zawartość pierwiastka aktywnego dodatku, [% wag.]	
	S	P
D2	14,5	6,8
D3	39,7	0,75

Właściwości smarne kompozycji badano za pomocą aparatu czterokulowego T-02 (prod. ITeE – PIB, Radom). Dla poszczególnych kompozycji wyznaczano wartości granicznego obciążenia zużycia (G_{oz}), obrazującego zdolność środka smarowego do izolowania elementów trących w warunkach ustalonego obciążenia, przy którym ruch odbywa się w warunkach tarcia mieszanego, oraz obciążenia zacierającego, będącego funkcją nośności (trwałości) warstwy smarowej. Jako elementy testowe węzłów tarcia stosowano kulki ze stali łożyskowej 100Cr6 o średnicy 12,7 mm. Przed testami tribologicznymi wszystkie elementy testowe myto w benzynie ekstrakcyjnej za pomocą myjki ultradźwiękowej przez 10 minut. Ocenę przeciwzatarciowego działania kompozycji smarowych prowadzono przy liniowym przyroście obciążenia w następujących warunkach: prędkość obrotowa wrzeciona 500 ± 20 obr/min, prędkość poślizgu 0,19 m/s, przyrost obciążenia 409 N/s, obciążenie końcowe 7400 ± 100 N, temperatura $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Właściwości przeciwzatarciowe kompozycji smarowych oceniano na podstawie wartości obciążenia zacierającego (P_1) wyznaczanego wg PN-EN ISO 20623:2010 *Przetwory naftowe i produkty podobne – Oznaczanie właściwości przeciwzatarciowych i przeciwzużyciowych cieczy – Metoda czterokulowa (warunki europejskie)*, natomiast odporność warstwy wierzchniej na zacieranie – na podstawie wartości granicznego nacisku zatarcia, wyznaczanego według metodyki opisanej w [L. 12]. Jako wynik testów przyjmowano średnią arytmetyczną z wyników co najmniej trzech biegów testowych, wolnych od błędu grubego. Przynależność poszczególnych wyników do zbioru danych weryfikowano za pomocą testu Q-Dixona przy 95-procentowym poziomie ufności.

Po ustaleniu wielkości obciążenia zacierającego dla poszczególnych kompozycji przeprowadzono testy przerywane przy różnych obciąże-

niach, ustalanych dla badanej kompozycji na podstawie wartości obciążenia zacierającego, tj.: przy $P = P_t - 400 \text{ N}$, $P = P_t$, $P = P_t + 400 \text{ N}$. Testy prowadzone w ten sposób umożliwiały badanie stanu chemicznego powierzchni tarcia *ex-post* tuż przed osiągnięciem obciążenia zacierającego, przy obciążeniu zacierającym i po przekroczeniu obciążenia zacierającego. Testy tribologiczne przerywane przy określonym obciążeniu przeprowadzono w taki sposób, aby jedyną zmienną był skład oleju. Pozwoliło to przyjąć założenie, że stwierdzone różnice składu chemicznego powierzchni tarcia są pochodną składu chemicznego oleju smarowego. Przy stałej zawartości pozostałych składników, rodzaj i zawartość dodatków smarnych determinują strukturę i właściwości warstwy granicznej, a w efekcie charakter przemian chemicznych warstwy wierzchniej powierzchni tarcia.

Powierzchnię tarcia po testach tribologicznych poddano szczegółowej analizie za pomocą mikroskopii optycznej, mikrospektroskopii w podczerwieni (MFTIR) oraz mikroanalizy rentgenowskiej (SEM/EDS). Na podstawie uzyskanych danych wnioskowano o mikrostrukturze powierzchni tarcia oraz stanie warstwy wierzchniej, zmodyfikowanej w czasie testu badawczego.

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Zależność wartości granicznego obciążenia zużycia oraz obciążenia zacierającego od zawartości dodatku D2 lub D3 w kompozycji smarowej, wytworzonej na bazie oleju podstawowego SAE 30/95, przedstawiono w **Tab. 3**. Szczegółową analizę właściwości przeciwzatarciowych tych kompozycji przeprowadzono w pracy [**L. 13**]. W niniejszej pracy podjęto próbę wyjaśnienia wpływu obecności dodatku w kompozycji smarowej na zmiany składu chemicznego powierzchni tarcia.

Jak wynika z danych **Tab. 3**, wartość granicznego obciążenia zużycia zależy zarówno od rodzaju dodatku smarnego, jak i od jego zawartości w oleju. W przypadku dodatku D2 wartość G_{oz} wzrastała wraz ze wzrostem jego zawartości w oleju. Inaczej ta zależność przedstawiała się w przypadku dodatku D3: najlepsze właściwości przeciwzużyciowe wykazywał on przy najmniejszej zawartości w oleju (0,5% wag.). W miarę wzrostu jego zawartości w kompozycji następowało pogorszenie działania przeciwzużyciowego.

Tabela 3. Wpływ rodzaju i ilości dodatków AW/EP w oleju podstawowym SAE 30/95 na wielkość granicznego obciążenia zużycia (G_{oz}) i obciążenia zacierającego (P_t)

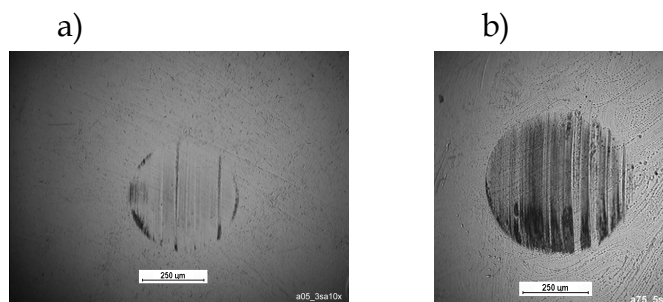
Table 3. Influence of the type and content of AW/EP additives in base oil SAE 30/95 on the limiting wear of load (G_{oz}) and scuffing load (P_t)

Środek smarowy	Zawartość dodatku [% wag.]	Graniczne obciążenie zużycia G_{oz} [N/mm ²]	Obciążenie zacierające P_t [N]
SAE	0	767	1200
SAE 30/95 + D2	0,5	826	1800
	1	838	1900
	2	923	2200
	5	1053	2500
	7,5	1102	2500
SAE 30/95 + D3	0,5	874	1800
	1	850	2000
	2	672	2300
	5	464	2100
	7,5	517	2000

Zwiększanie nośności filmu smarowego (wzrost wartości P_t) jest korzystne dla trwałości i niezawodności wężła tarcia. Przeprowadzone badania tribologiczne przygotowanych kompozycji smarowych (**Tab. 3**) wykazały, że właściwości smarne, charakteryzowane wielkością obciążenia zacierającego P_t , uległy poprawie w wyniku wprowadzenia do oleju dodatku AW/EP, jednak nie wprost proporcjonalnie do zawartości dodatku w oleju. Stwierdzono monotoniczny przyrost wartości obciążenia zacierającego ze wzrostem stężenia dodatku D2 w oleju. Natomiast w przypadku kompozycji zawierających dodatek D3 następowała poprawa ich właściwości przeciwwzartarciowych przy zawartości dodatku do 2% (po przekroczeniu tej zawartości następowało pogorszenie tych właściwości). Można założyć, że w tym przypadku wzrost zawartości dodatku w kompozycji powodował destabilizację warstwy granicznej.

Na podstawie analizy obrazów mikroskopowych stwierdzono, że w śladach tarcia kulek przed przerwaniem warstwy smarowej (przy $P = P_t - 400 N$), niezależnie od rodzaju i stężenia dodatku w oleju smarowym, powstawały charakterystyczne ciemne smugi. Brak cech zużycia warstwy wierzchniej na tej powierzchni wskazuje, że są to produkty reakcji zachodzących pomiędzy powierzchnią stali i składnikami oleju.

Obrazy śladów tarcia (uzyskane za pomocą mikroskopii optycznej) na kulkach smarowanych olejem, zawierającym dodatek D2, przedstawiono na **Rys. 1**. Wielkość tych śladów zależy od obciążenia, przy którym przerwano test, co pośrednio jest związane ze stężeniem dodatku w oleju (im wyższe stężenie, tym wyższa wartość obciążenia, przy którym przerywano test). Ciemne smugi przebiegały zgodnie z kierunkiem tarcia, zaś stopień pokrycia powierzchni śladu tarcia zależał także od stężenia dodatku w oleju. Podobne zjawisko występowało w przypadku obu badanych dodatków.



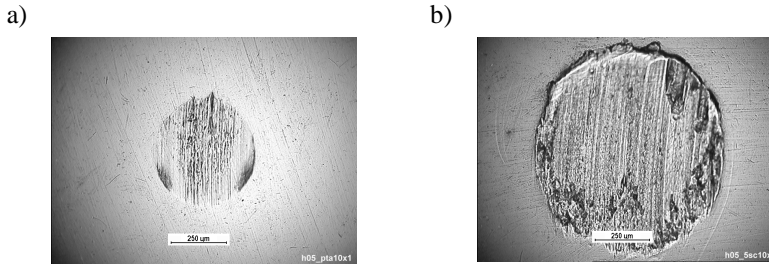
Rys. 1. Widok powierzchni śladu tarcia powstałego przed przerwaniem warstwy smarowej na kulce smarowanej olejem SAE 30/95, zawierającym: a) 0,5% D2, b) 7,5% D2

Fig. 1. Image of the wear scars formed before breakdown of lubrication layer on the ball lubricated with SAE 30/95 containing: a) 0,5% D2, b) 7,5% D2

Na **Rys. 2** przedstawiono obrazy powierzchni tarcia w chwili osiągnięcia obciążenia zacierającego i po przekroczeniu tej wartości o 400 N. Na **Rys. 2a** przedstawiono ślad powstały na kulce podczas inicjacji zacierania (przy osiągnięciu P_t). Najwyższe naprężenia Hertza występują w środkowej strefie styku. Sprzyja to powstawaniu szepień adhezyjnych i, w efekcie, inicjowaniu zacierania, co potwierdza obraz śladu tarcia przedstawiony na **Rys. 2a**. Boczne obszary strefy styku nie wykazują znamion zużycia, natomiast pojawiają się na nich, podobnie jak w śladach powstałych przed przerwaniem warstwy smarowej, ciemne smugi zdeponowanych na powierzchni produktów reakcji oleju ze składnikami stali.

W miejscach styku po przerwaniu warstwy smarowej (**Rys. 2b**), tzn. po przekroczeniu P_t , po którym następuje gwałtowny wzrost momentu tarcia, zachodziło intensywne zużywanie materiału (wzrost powierzchni styku). Cała powierzchnia styku nosiła znamiona zużycia adhezyjno-

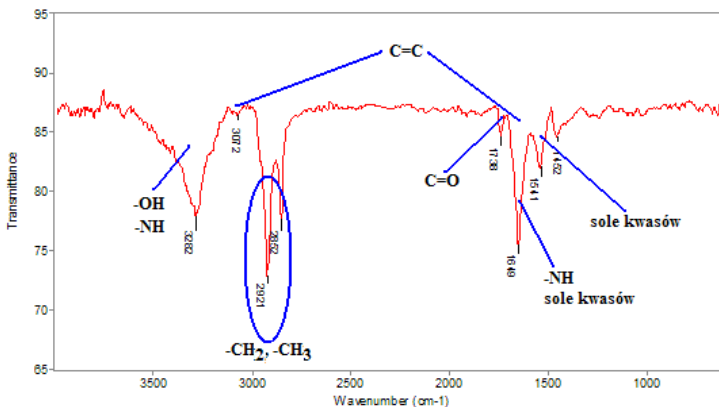
-abrazyjnego i nie występowały na niej depozyty produktów przekształcenia składników oleju (ciemne smugi).



Rys. 2. Widok powierzchni śladu tarcia powstałego na kulce smarowanej olejem SAE 30/95 zawierającym 0,5% D3: a) w momencie przzerwania warstwy smarowej ($P = P_t$), b) po przzerwaniu warstwy smarowej ($P = P_t + 400 \text{ N}$)

Fig. 2. Image of the wear scar formed on the ball lubricated with SAE 30/95 containing 0,5% D3: a) at the moment of breakdown of lubrication layer ($P = P_t$), b) after breakdown of lubrication layer ($P = P_t + 400 \text{ N}$)

Produkty zdeponowane na powierzchni styku przy obciążeniu $P = P_t - 400$ zbadano za pomocą mikrospektroskopii w podczerwieni. Na podstawie analizy uzyskanych wyników stwierdzono, że ciemny depozyt na powierzchni styku tworzą substancje organiczne (**Rys. 3**). Natomiast w miejscach śladu tarcia, w których dochodziło do zużycia powierzchni, nie zidentyfikowano ich obecności.



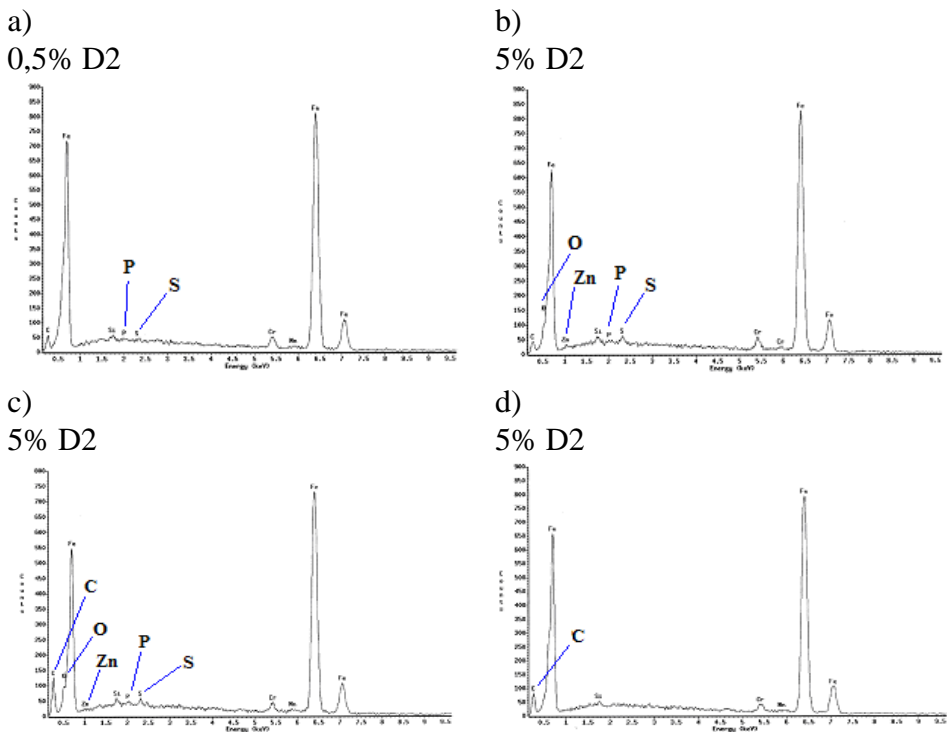
Rys. 3. Widmo IR produktów organicznych odłożonych w śladzie tarcia przed przzerwaniem warstwy smarowej podczas testu tribologicznego z udziałem oleju SAE 30/95 zawierającego 5% D2

Fig. 3. IR spectrum of the organic products deposited in the wear scar before breakdown of lubrication layer during tribological test with the participation of SAE containing 5% D2

W widmie, przedstawionym na **Rys. 3**, pasmo charakterystyczne dla dodatku (1008 cm^{-1} – drgania grupy P-O-C) nie nadaje się do celów interpretacyjnych ze względu na słaby sygnał i zaszumienie tego fragmentu widma. Wartość interpretacyjną mają natomiast pasma charakterystyczne dla węglowodorów, mydeł, a także grup hydroksylowych i karbonylowych. Sygnały pochodzące od tych struktur występowały w widmach IR zarejestrowanych na powierzchniach pokrytych depozytem, powstałym w obrębie śladu tarcia przed przerwaniem warstwy smarowej. Niezależnie od rodzaju dodatku i jego stężenia w oleju, zarejestrowane widma IR miały zbliżony przebieg. Różnice dotyczyły jedynie stosunku intensywności pomiędzy poszczególnymi pasmami. Analiza tych widm pozwala jednoznacznie stwierdzić, że na powierzchni tarcia przy obciążeniu zbliżonym do zacierającego ($P = P_t - 400\text{ N}$) powstają i są deponowane substancje organiczne – kwasy tłuszczowe oraz ich sole, zawierające najprawdopodobniej żelazo. Świadczy o tym obecność takich pasm jak: 2921 , 2852 oraz 1452 cm^{-1} (grupy $-\text{CH}_3$ i $-\text{CH}_2-$), 3282 cm^{-1} (kwasy organiczne), 1736 cm^{-1} (grupy karbonylowe) oraz 1649 i 1541 cm^{-1} (sole kwasów organicznych i metali w formie jonowej) [**L. 14**]. Analiza widm IR wykazała, że w warunkach tarcia, kiedy współpracujące elementy jeszcze rozdziela środek smarowy, jego składniki ulegają przemianom, w wyniku których powstają związki tlenoorganiczne (np. kwasy, estry) oraz sole kwasów karboksylowych, a także związki kompleksowe [**L. 15**, **16**]. Najprawdopodobniej w procesach tych uczestniczą, a być może nawet je inicjują, dodatki triboaktywne, lecz ich ilość w badanych kompozycjach była zbyt niska do wykrycia produktów ich przemian techniką odbiciowej spektroskopii IR.

Na **Rys. 4** przedstawiono widma EDS zarejestrowane na powierzchniach śladów tarcia, powstałych na kulkach smarowanych olejami zawierającymi dodatek D2. **Rys. 4a** i **4b** odzwierciedlają wpływ stężenia dodatku w oleju na skład chemiczny powierzchni styku przed przerwaniem warstwy smarowej. Jak wynika z tych danych, wzrost stężenia dodatku w oleju powodował zwiększenie zawartości pierwiastków aktywnych (siarki i fosforu) na powierzchni tarcia oraz pojawienie się na niej cynku i tlenu. Pierwiastki te wchodziły w skład dodatku, a ich obecność na powierzchni tarcia wskazuje, że dodatek D2 jeszcze przed wystąpieniem nacisków powodujących zacieranie reaguje z powierzchnią styku tarciowego. Obecność tlenu mogła być także wynikiem utlenienia składników oleju lub powierzchni tarcia (z udziałem tlenu z otoczenia). Na **Rys. 4c**

przedstawiono widmo EDS zarejestrowane na powierzchni styku powstałego w chwili osiągnięcia obciążenia zacierającego. Po zestawieniu go z widmem przedstawionym na **Rys. 4b** nasuwa się wniosek, że skład chemiczny powierzchni tarcia nie ulegał znaczącym zmianom pomiędzy obciążeniem niższym o 400 N od zacierającego a obciążeniem zacierającym. Różnica dotyczyła jedynie stężenia węgla w warstwie wierzchniej: było ono wyraźnie wyższe przy obciążeniu zacierającym.



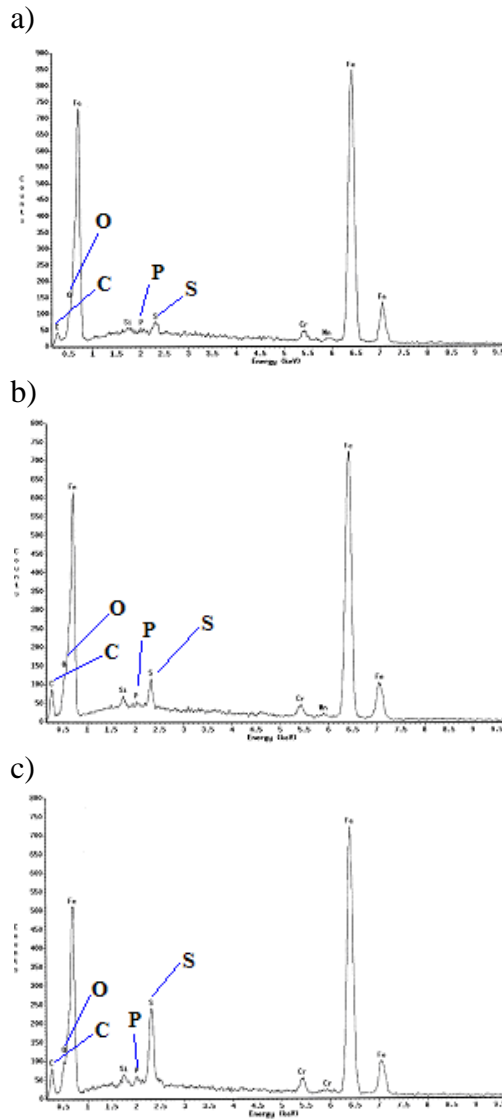
Rys. 4. Widma EDS zarejestrowane w śladach tarcia powstałych na kulkach smarowanych olejem SAE 30/95 zawierającym dodatek D2: przed przerwanieniem warstwy smarowej $P = P_t - 400$ N (a, b), w momencie przerwania warstwy smarowej $P = P_t$ (c) oraz po przerwaniu warstwy smarowej $P = P_t + 400$ N (d)

Fig. 4. EDS spectra recorded in the wear scars formed on the balls lubricated with SAE 30/95 containing D2: before breakdown of lubrication layer $P = P_t - 400$ N (a, b), at the moment of breakdown of lubrication layer $P = P_t$ (c) and after breakdown of lubrication layer $P = P_t + 400$ N (d)

Źródłem węgla były węglowodory wchodzące w skład środka smarowego, z czego można wnioskować, że przy obciążeniu zacierającym intensyfikowały się ich przemiany tribochemiczne. Można przewidywać, że podczas zacierania, któremu towarzyszy zużywanie powierzchni węzła tarcia, związki siarki, fosforu, tlenu i węgla są usuwane ze strefy styku i w ten sposób działają ochronnie na węzeł, zapobiegając jego zespawaniu. Tezę tę potwierdzają dane przedstawione na **Rys. 4d**. Na roboczej powierzchni węzła tarcia poddanego obciążeniu większemu o 400 N niż obciążenie zacierające nie stwierdzono obecności pierwiastków, wchodzących w skład dodatku D2. Były one obecne na powierzchni tarcia, gdy test przerwano przy obciążeniu zacierającym, dlatego też można przyjąć, że przekroczenie obciążenia zacierającego powoduje zniszczenie ochronnej warstewki wytworzonej przez dodatek smary oraz produkty tribochemicznych przemian składników oleju.

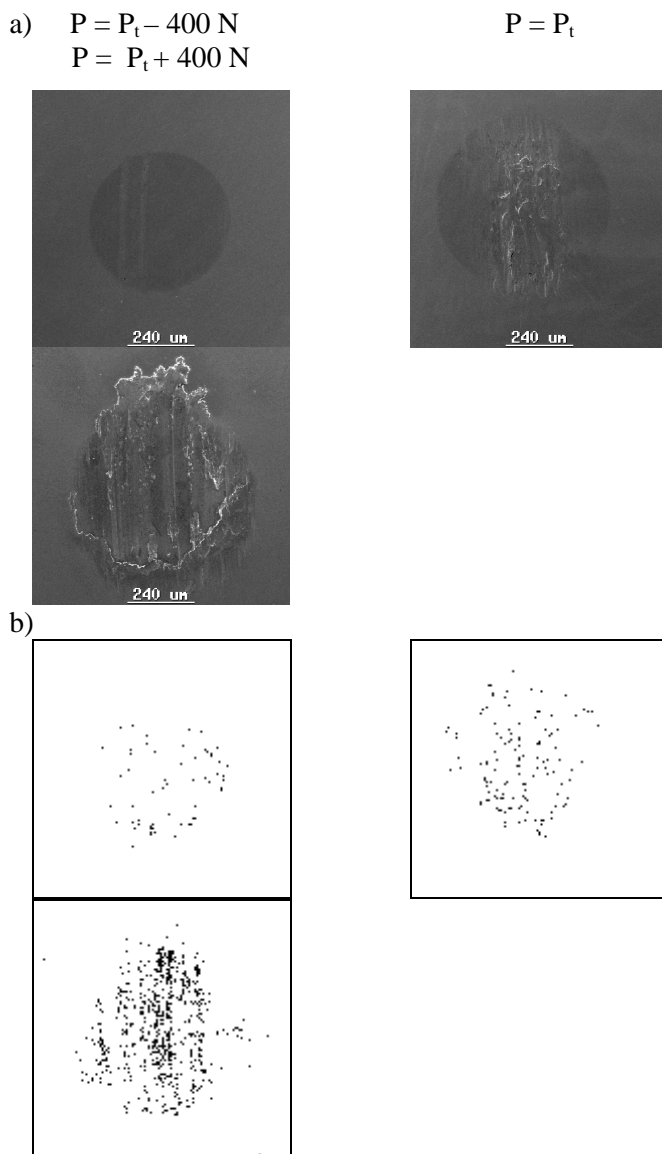
Sytuację odmienną zaobserwowano natomiast dla węzła smarowanego olejem SAE zawierającym 5% D3 (**Rys. 5**). W tym przypadku wzrost obciążenia węzła tarcia w przedziale $P_{i\pm 400}$ N sprzyjał modyfikacji warstwy wierzchniej przez składniki oleju, o czym świadczył wzrost intensywności sygnałów, pochodzących od fosforu i siarki (**Rys. 6**) i nie powodował usunięcia z niej związków węgla i tlenu. Podobnie jak w przypadku testów tribologicznych z udziałem dodatku D2, przerwanie warstwy smarowej powodowało znaczny wzrost udziału ilościowego węgla w warstwie wierzchniej śladu tarcia. Było to najprawdopodobniej związane z powstawaniem nieorganicznych związków węgla na skutek tribochemicznych przemian węglowodorów.

Różnice w sposobie oddziaływania dodatków D2 i D3 w czasie przetrwania warstwy smarowej wynikały z odmiennej reaktywności dodatków (zawartości pierwiastków aktywnych tribologicznie), co potwierdziły wyniki mappingu EDS powierzchni śladów tarcia, zarejestrowane dla poszczególnych faz testów. W przypadku elementów smarowanych olejem zawierającym „mniej aktywny” dodatek D2, obecność siarki i tlenu stwierdzono jedynie w śladach tarcia, powstających do przetrwania filmu smarowego (do P_i). Prawdopodobnie tuż po przetrwaniu warstwy smarowej produkty reakcji tribochemicznych, zachodzących pomiędzy stałą i składnikami środka smarowego, były usuwane z powierzchni styku.



Rys. 5. Widma EDS zarejestrowane w śladach tarcia powstałych na kulkach smarowanych olejem SAE 30/95 zawierającym 5% D3 przed przerwaniem warstwy smarowej – $P = P_t - 400$ N (a), w momencie przerwania warstwy smarowej – $P = P_t$ (b) oraz po przerwaniu warstwy smarowej – $P = P_t + 400$ N (c)

Fig. 5. EDS spectra recorded in the wear scars formed on the balls lubricated with SAE 30/95 containing 5% D3 before breakdown of lubrication layer $P = P_t - 400$ N (a), at the moment of breakdown of lubrication layer $P = P_t$ (b) and after breakdown of lubrication layer $P = P_t + 400$ N (c)



Rys. 6. Obrazy SEM (a) oraz mapy EDS rozmieszczenia siarki (b) na powierzchniach tarcia zarejestrowane w różnych fazach testów tribologicznych z udziałem oleju SAE 30/95 zawierającego 5% D3

Fig. 6. SEM image (a) and EDS maps of sulphur distribution (b) on the friction surfaces recorded at different stages of tribological tests with participation of SAE 30/95 containing 5% D3

PODSUMOWANIE

Na podstawie obrazów SEM (różnice w deformacji plastycznej warstwy wierzchniej) oraz map rozmieszczenia siarki na powierzchni tarcia, zarejestrowanych po różnych fazach procesu tarcia z udziałem uszlachetnionego oleju mineralnego SAE 30/95, stwierdzono że dodatek D3 (39,7% m/m siarki, 0,75% m/m fosforu) intensywniej reagował z warstwą wierzchnią stali niż dodatek D2 (14,5% m/m siarki, 6,8% m/m fosforu). W śladzie tarcia, jeszcze przed przerwaniem warstwy smarowej, zidentyfikowano obecność siarki. Wzrost obciążenia powodował zwiększenie jej zawartości na roboczej powierzchni. W efekcie, powierzchnia tarcia smarowana olejem zawierającym D3 była na tyle zmodyfikowana związkami siarki, że wykazywała większą plastyczność, niż powierzchnia smarowana olejem zawierającym D2. Skutkowało to obniżeniem wartości obciążenia zacierającego wraz ze wzrostem zawartości dodatku D3 w oleju.

Praca naukowa wykonana w ramach realizacji Programu Strategicznego pn. „Innowacyjne systemy wspomagania technicznego zrównoważonego rozwoju gospodarki” w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka.

LITERATURA

1. Burakowski T., Wierzchoń T.: Inżynieria powierzchni metali. WNT, Warszawa, 1995.
2. Sep J.: Analysis of tribological properties of steel sliding elements with two-component surface layer in lubricated contact. *Wear*, 2011, 271, 616–620.
3. Manabe K, Nakano K.: Breakdown of oil films and formation of residual films. *Trib. Intern.*, 2008, 41, 1103–1113.
4. Stachowiak G.W., Batchelor A.W.: *Engineering tribology*. Butterworth-Heinemann, 2006, 363–417.
5. Burakowski T., Marczak R.: Eksploatacyjna warstwa wierzchnia i jej badanie. *ZEM*, 1995, 3(103), 327–337.
6. Kalin M., Vižintin J.: A comparison of the tribological behaviour of steel/steel, steel/DLC and DLC/DLC contacts when lubricated with mineral and biodegradable oils. *Wear*, 2006, 261, 22–31.
7. Neville A., Morina A., Haque T., Voong M.: Compatibility between tribological surfaces and lubricant additives – How friction and wear reduc-

- tion can be controlled by surfach/lube synergies. *Trib. Intern.*, 2007, 40, 1680–1695.
8. Konchits V.V., Myszkina N.K.: Organic deposits on friction surface and their role in boundary lubrication. *Proc. of 13th Intern. Coll. on Tribology, Esslingen, 2002*, 1259–1268.
 9. Nakayama K., Martin J.M.: Tribochemical reactions at and in the vicinity of a sliding contact. *Wear*, 2006, 261, 235–240.
 10. Matuszewska A., Grądkowski M.: Antiwear action of mineral lubricants modified by conventional and unconventional additives. *Tribology Letters*, 2007, 2(27), 177–180.
 11. Masuko M., Shibatsuji M., Yokomizo M., Suzuki A.: On the effort to discriminate the principal function of tribofilm on friction under the boundary lubrication condition. *Trib. Intern.*, 2011, 44, 702–710.
 12. Szczerek M., Tuszyński W.: *Badania tribologiczne. Zacieranie. ITeE, Radom, 2000.*
 13. Matuszewska A., Grądkowski M., Makowska M.: Optymalizacja zawartości dodatków smarnych w modelowych kompozycjach smarowych. *Tribologia*, 2009, 3, 171–184.
 14. Matuszewska A.: Tribologiczna ocena efektywności środków smarowych przeznaczonych do stalowych węzłów tarcia. *Rozpr. dokt., Politechnika Krakowska, 2008*, 171.
 15. Kajdas C., Majzner M.: Tribochemiczne przemiany kwasów tłuszczowych. *Tribologia*, 2000, 3, 375–390.
 16. Makowska M., Kajdas C., Grądkowski M.: Mechanism of boundary film formation from n-hexadecane. *Lubr. Sci.*, 2004, 16–2, 101–110.

Recenzent:
Dariusz OZIMINA

Summary

The primary objective of this work was to investigate the chemical composition of the sliding surfaces during tribological tests with the participation of lubricants based on mineral oil SAE 30/95 and selected AW/EP additives containing sulphur and phosphorus. Standard parameters – limiting wear of load (Goz) and scuffing load (Pt) – were measured by means of a specialised four-ball machine T-02 (made in Institute for Sustainable Technologies in Radom). Tribological tests were carried out during a linear increase of load (P). Some experiments were paused before (P = Pt – 400 N) and after

reaching scuffing load ($P = P_t + 400 \text{ N}$). To investigate in detail sliding steel surfaces, the researchers used analytical techniques including FTIRM, SEM/EDS, and FTIRM. Results indicate that some organic products of tribochemical conversions of the lubricant were present on the steel surface before the breakdown of lubrication layer. There were no organic compounds on the rubbing surface when load was equal or higher than P_t (then chemical structure of the surface was modified – increase of the content of oxygen, carbon and active elements coming from additives).