

Ryszard RUTA^{*}, Anna MATUSZEWSKA^{**}, Marian GRĄDKOWSKI^{*}

MODELOWANIE WPLYWU DODATKÓW AW/EP NA WŁAŚCIWOŚCI TRIBOLOGICZNE ŚRODKÓW SMAROWYCH

MODELLING THE RELATIONSHIP BETWEEN ADDITIVES AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF LUBRICANTS

Słowa kluczowe:

kompozycje smarowe, dodatki smarne, zacieranie, zużycie

Key words:

lubricant compositions, lubricating additives, scuffing, wear

Streszczenie

W artykule przedstawiono rezultaty analizy statystycznej wyników badania wpływu rodzaju oraz zawartości komercyjnych pakietów dodatków smarnych w mineralnym oleju bazowym na właściwości kompozycji smarowej utworzonej na jego bazie. Badania tribologiczne prowadzono za pomocą aparatu czterokulowego T-02. Oceny właściwości smarnych wytworzonych kompozycji dokonywano na podstawie wielkości granicznego obciążenia zużycia (G_{oz}) oraz granicznego nacisku zatarcia (p_{oz}). W rezultacie przeprowadzonych badań

^{*} Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom.

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

oszacowano wpływ zawartości wybranych dodatków smarnych na wartości charakterystyk G_{oz} i p_{oz} wytworzonych kompozycji. Na podstawie tych danych opracowano istotnie statystycznie modele regresyjne, odwzorowujące wpływ zawartości wybranych dodatków przeciwzużyciowych i przeciwzatarciowych na właściwości smarne kompozycji wytworzonych na bazie mineralnego oleju bazowego.

WPROWADZENIE

Trwałość i niezawodność urządzeń technicznych w zasadniczym stopniu determinowana jest trwałością węzłów tarcia, w których skupiają się niszczące skutki tarcia. W praktyce kształtowanie trwałości węzłów tarcia odbywa się na drodze doboru materiałów konstrukcyjnych, obróbki ich powierzchni oraz doboru materiałów smarowych. Nie ulega jednak wątpliwości, że właściwości warstwy wierzchniej współpracujących powierzchni w znacznym stopniu determinują trwałość systemu tribologicznego. To w obrębie warstwy wierzchniej zachodzą wszystkie zjawiska i procesy związane ze zużywaniem i zacieraniem. Kluczowe właściwości warstwy wierzchniej kształtowane są na etapie wytwarzania elementów maszyn [L. 1–2]. Jednak podczas eksploatacji, w warunkach tarcia granicznego i mieszanego, skład chemiczny, a w konsekwencji właściwości fizyczne warstwy wierzchniej zmieniają się w wyniku jej oddziaływania ze składnikami środka smarowego [L. 3–5]. Kluczową rolę w tym względzie odgrywają aktywne tribologicznie siarka i fosfor, które w złożonych procesach tribochemicznych kształtują właściwości warstwy wierzchniej podczas eksploatacji [L. 6]. Wynika stąd wniosek, że zmieniając skład chemiczny środka smarowego można modyfikować skład warstwy wierzchniej, a w konsekwencji kształtować system tribologiczny w taki sposób, aby wykazywał on optymalną odporność na zużywanie i zacieranie. Dlatego też jedną z powszechnie stosowanych metod przeciwdziałania negatywnym skutkom tarcia jest wprowadzenie do węzła środka smarowego o odpowiednio dobranym składzie. Ponieważ dotychczas nie został opracowany powszechnie uznany opis teoretyczny, łączący właściwości fizykochemiczne środka smarowego ze zjawiskami i procesami towarzyszącymi tarcu, zasadniczym narzędziem doboru środka smarowego o pożądanych własnościach są odpowiednio zaprojektowane badania empiryczne. Mają one charakter iteracyjny i z reguły są czasochłonne i kosztowne.

Celem pracy jest opracowanie modeli matematycznych opisujących wpływ zawartości w oleju wybranych dodatków przeciwzużyciowych i przeciwzatarciowych na właściwości smarne kompozycji wytworzonych z użyciem mineralnego oleju bazowego.

PRZEDMIOT I METODY BADAŃ

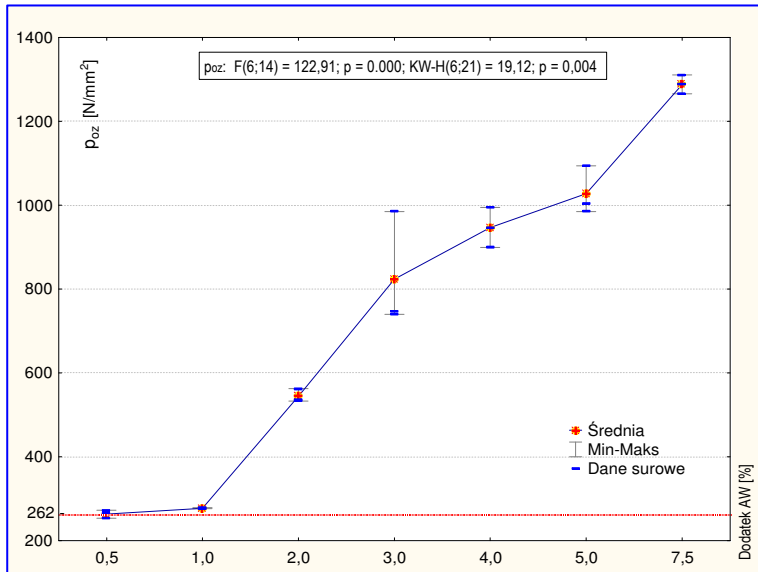
W badaniach wykorzystano dwa komercyjne pakiety dodatków smarnych: jeden o działaniu przeciwzużyciowym (AW), drugi – przeciwzatarciowym (EP). Dodatek AW, oparty na dialkilotifosforanach, zawierał w swym składzie 14,5% masowych siarki i 6,8% fosforu. Natomiast dodatek EP, w którym dominowała siarka, stanowiąca 39,7% jego masy, zawierał także śladowe ilości fosforu – 0,75%. Poszczególne pakiety dodatków wprowadzano do mineralnego oleju bazowego w ilości od 0,5% do 7,5% wagowych i tak utworzoną kompozycję homogenizowano poprzez mechaniczne mieszanie. Jako olej bazowy wykorzystano podstawowy olej mineralny o wskaźniku lepkości 107 (lepkość kinematyczna w temp. 40°C – 78,7 mm/s², a w 100°C – 9,97 mm/s²) oraz średniej wartości granicznego obciążenia zużycia, wynoszącej 767 N/mm² i średniej wartości granicznego nacisku zatarcia, wynoszącego 262 N/mm² [L. 7].

Właściwości smarne wytworzonych kompozycji badano za pomocą aparatu czterokulowego T-02. W metodzie tej elementy testowe węzłów tarcia stanowią kulki ze stali łożyskowej 100Cr6 o średnicy 0,5". Przed testami tribologicznymi wszystkie elementy testowe oczyszczano w benzynie ekstrakcyjnej za pomocą myjki ultradźwiękowej przez 10 minut.

Jako miarę właściwości smarnych badanych kompozycji przyjęto wartości granicznego nacisku zatarcia (p_{oz}) oraz granicznego obciążenia zużycia (G_{oz}). Badania odporności warstwy wierzchniej na zacieranie (p_{oz}) w poszczególnych kompozycjach smarowych prowadzono zgodnie z metodyką opisaną w [L. 8]. Testy tribologiczne prowadzono przy obciążeniu rosnącym od 0 do 7400±100 N ze stałą szybkością 409 N/s. Szybkość obrotowa wrzeciona napędzającego górną kulkę testową wynosiła 500±20 obr./min, co zapewniało prędkość poślizgu 0,19 m/s. Temperaturę otoczenia regulowano w przedziale 20±2°C, wilgotności nie stabilizowano. Jako parametr, charakteryzując przeciwzużyciowe właściwości kompozycji smarowych, stosowano wskaźnik G_{oz} wyznaczony zgodnie z metodyką opisaną w normie PN-76/C-04147 i zmodyfikowaną wg wytycznych WTWT-04/MPS-025. Rezultaty testów weryfikowano ze względu na możliwość wystąpienia wyników odstających za pomocą testu Q-Dixona przy 95% poziomie ufności. Jako wynik pomiaru przyjmowano średnią arytmetyczną z wyników co najmniej trzech niezależnych testów wolnych od błędu grubego.

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Przedmiotem analizy statystycznej [L. 9] były wyniki badań właściwości smarnych środków smarowych wytworzonych na bazie mineralnego oleju bazowego i pakietów dodatków AW lub EP. Na **Rys. 1** przedstawiono wartości średnie wraz z danymi surowymi granicznego nacisku zatarcia p_{oz} w zależności od zawartości dodatku AW w oleju bazowym.

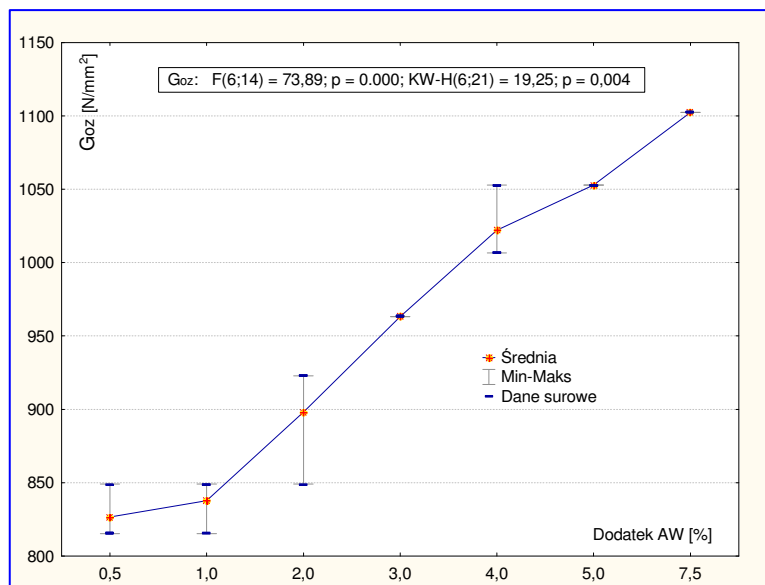


Rys. 1. Zależność wartości granicznego nacisku zatarcia p_{oz} od zawartości dodatku AW w oleju bazowym

Fig. 1. Chart of the average value of the limiting pressure of seizure p_{oz} in dependence of AW additive

Jak wynika z danych przedstawionych na **Rys. 1**, przy małych zawartościach dodatku AW w oleju (0,5–1%) obserwuje się nieznaczny przyrost wartości p_{oz} (w stosunku do wartości p_{oz} oleju bazowego). Dopiero zwiększenie zawartości dodatku w oleju do 2% skutkuje wyraźną poprawą działania przeciwzatarciowego kompozycji smarowej: począwszy od 2% zawartości dodatku w oleju wartość p_{oz} wzrasta ściśle monotonicznie do wartości 1100 N/mm², która jest osiągnięta przy 7,5-procentowej zawartości dodatku AW. Pokazane na **Rys. 1** wartości statystyk F Fischera i statystyki KH–W (Kruskala-Wallisa) oraz wartości odpowiadających im prawdopodobieństw testowych p , mniejszych od przyjętego poziomu istotności 0,05, wskazują na istotność statystyczną (na poziomie istotności 0,05) wpływu zawartości dodatku AW na badaną cechę – p_{oz} .

Podobnie zmienia się zależność średnich wartości granicznego obciążenia zużycia G_{oz} od zawartości dodatku AW w mineralnym oleju bazowym przedstawiona na **Rys 2**. W tym przypadku 0,5% dodatku AW w oleju bazowym zauważalnie zwiększa działanie przeciwzużyciowe użytego oleju bazowego. Zwiększanie zawartości dodatku do 7,5% zapewnia monotoniczny przyrost wartości parametru G_{oz} . Również w tym przypadku wartości statystyk F Fischera i statystyki KH–W oraz wartości odpowiadających im prawdopodobieństw testowych p , mniejszych od 0,05 wskazują na istotność statystyczną (na poziomie istotności 0,05) wpływu zawartości dodatku na badaną własność G_{oz} .



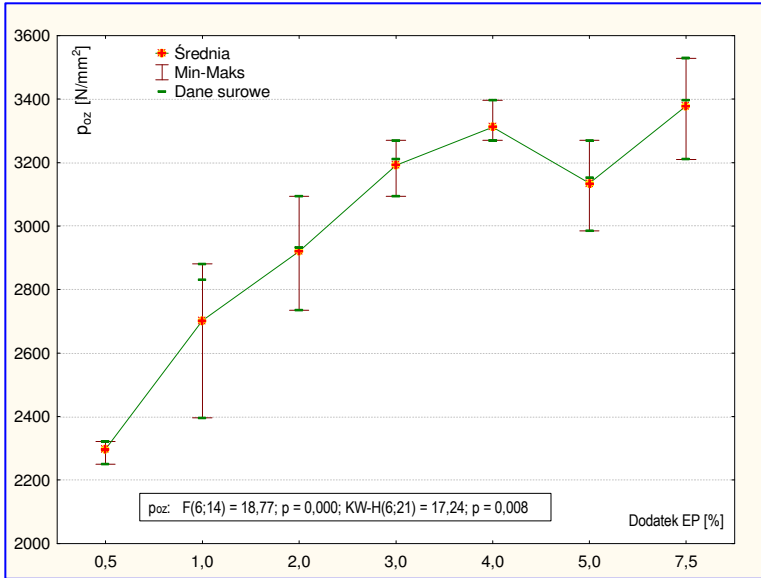
Rys. 2. Zależność wartości granicznego obciążenia zużycia G_{oz} od zawartości dodatku AW w oleju bazowym

Fig. 2. Chart of average value of limiting pressure wear G_{oz} in dependence of AW additive

Na kolejnych rysunkach przedstawiono dane obrazujące zależność wartości p_{oz} (**Rys. 3**) i G_{oz} (**Rys. 4**) od zawartości dodatku EP w mineralnym oleju bazowym. Zależność wartości p_{oz} od zawartości dodatku EP w oleju bazowym, przedstawiona na wykresie (**Rys. 3**) świadczy o ściśle monotonicznym wzroście działania przeciwzatarciowego dodatku EP do jego 4% zawartości w kompozycji. Zwiększenie zawartości tego dodatku w oleju powyżej tej ilości skutkuje pewnym osłabieniem tendencji wzrostowej parametru p_{oz} .

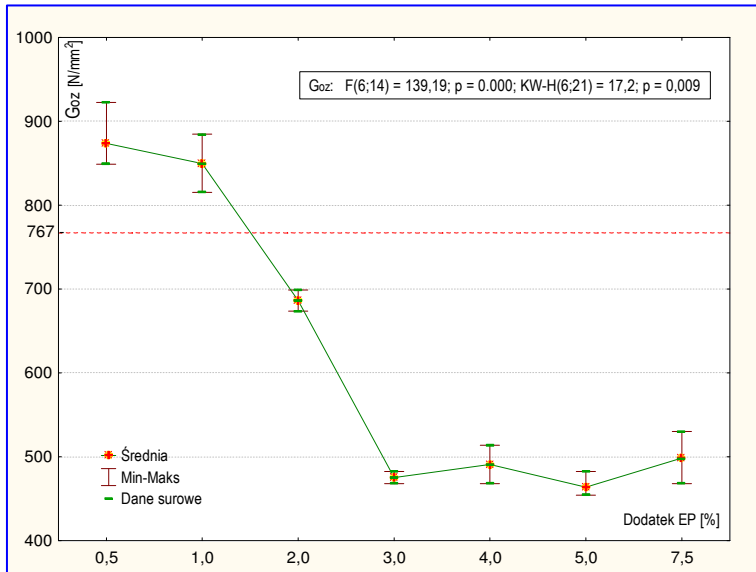
Analiza danych przedstawionych na **Rys. 4** wykazała, że użyty dodatek EP pogarsza właściwości przeciwzużyciowe mineralnego oleju bazowego. Jedynie przy stosunkowo małych zawartościach tego dodatku w oleju (0,5–1,0%) wartość G_{oz} ulega nieznacznemu, 10–14% zwiększeniu. Ale już przy jego 2% zawartości w oleju następuje zmniejszenie wartości G_{oz} poniżej wartości charakterystycznej dla oleju bazowego. Zwiększenie zawartości tego dodatku w oleju powyżej 2% powoduje spadek wartości G_{oz} do poziomu nieprzekraczającego 500 [N/mm²].

Również w tych przypadkach wartości statystyk F Fischera i statystyki KH-W oraz wartości odpowiadających im prawdopodobieństw testowych p , mniejszych od 0,05 wskazują na istotność statystyczną (na poziomie istotności 0,05) wpływu zawartości dodatku EP na badane własności przeciwzatarciowe i przeciwzużyciowe.



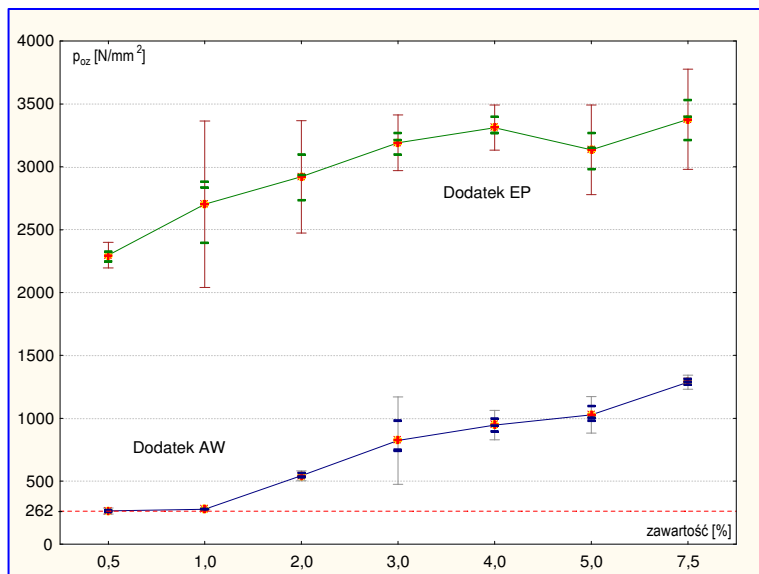
Rys. 3. Zależność wartości granicznego nacisku zatarcia p_{oz} od zawartości dodatku EP w oleju bazowym

Fig. 3. Chart of average value of limiting pressure of seizure p_{oz} in dependence of additive EP



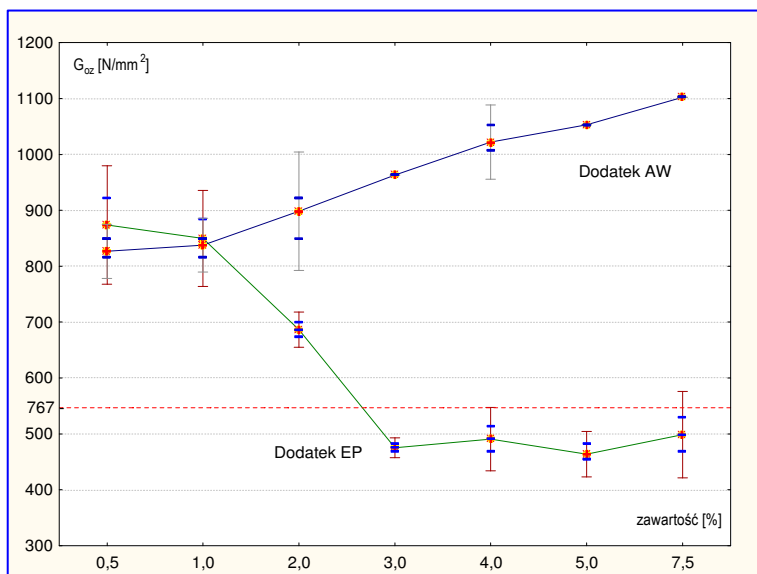
Rys. 4. Zależność wartości granicznego obciążenia zużycia G_{oz} od zawartości dodatku EP w oleju bazowym

Fig. 4. Chart of average value of limiting pressure wear G_{oz} in dependence of EP additive



Rys. 5. Porównanie wartości granicznego nacisku zatarcia p_{oz} kompozycji smarowych zawierających różne ilości dodatku AW lub EP w oleju bazowym

Fig. 5. Charts of averages values of limiting pressure of seizure p_{oz} in dependence of AW/EP additive



Rys. 6. Porównanie wartości granicznego obciążenia zużycia G_{oz} kompozycji smarowych zawierających różne ilości dodatku AW lub EP w oleju bazowym

Fig. 6. Charts of averages values of limiting pressure wear G_{oz} in dependence of AW/EP additive

Na **Rys. 5** porównano wpływ zawartości dodatków AW oraz EP w oleju bazowym na właściwości przeciwzatarciowe (p_{oz}) wytworzonych kompozycji smarowych. Wzrost zawartości w oleju obu typów dodatków zapewnia wzrost tego parametru, przy czym dodatek EP jest wyraźnie efektywniejszy (co było do przewidzenia) od dodatku AW.

Natomiast na **Rys. 6** dokonano podobnego porównania wpływu zawartości dodatków AW i EP na właściwości przeciwzużyciowe wytworzonych środków smarowych. Charakterystyczne są diametralnie różne oddziaływania dodatków AW i EP na własności przeciwzużyciowe badanego środka smarowego. Jak należało oczekiwać, zwiększenie zawartości dodatku AW zwiększa własności przeciwzużyciowe środka smarowego. Natomiast zwiększanie zawartości dodatku EP powoduje radykalne pogorszenie własności przeciwzużyciowych, pomimo tego, że po dodawaniu małych ilości (do 1%) dodatku wystąpiła niewielka poprawa tych własności w odniesieniu do oleju bazowego. Zaobserwowany efekt można wyjaśnić mechanizmem działania dodatków EP: ma on charakter łagodnej korozji. Ze wzrostem zawartości dodatku EP w oleju rośnie zawartość w nim korozyjnie działającej siarki. Na wynik testu może mieć wpływ także czas trwania testu. W przypadku badania działania przeciwzużyciowego test trwa 3600 s, zaś przeciwzatarciowego jedynie 18 s. W pierwszym przypadku czas testu może być wystarczający do wzrostu znaczenia zużycia korozyjno-zmęczeniowego, co przejawiało się istotnym zmniejszeniem wartości G_{oz} przy 2-procentowej i większej zawartości dodatku EP w oleju bazowym.

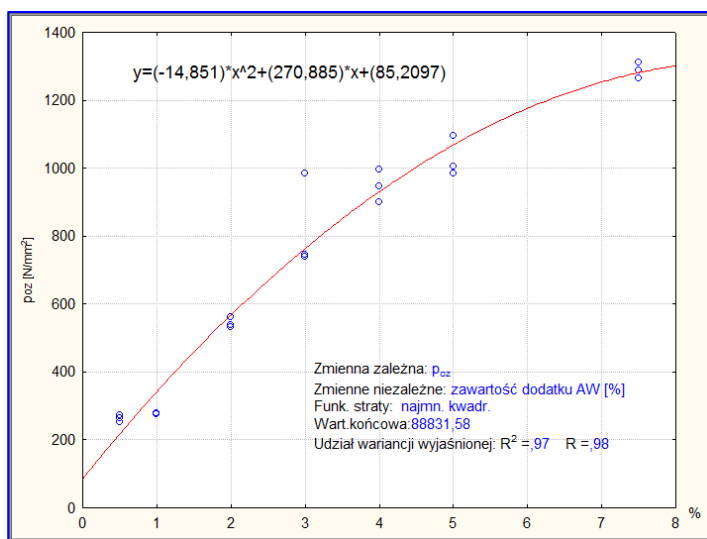
MODELE MATEMATYCZNE

Stwierdzenie istotności statystycznej wpływu zawartości dodatków AW/EP na własności przeciwzużyciowe i przeciwzatarciowe środka smarowego uzasadniało poszukiwanie matematycznych modeli odwzorowujących te zależności.

Zasadniczym narzędziem wykorzystywanym do budowy modelu matematycznego na podstawie wyników badań empirycznych obarczonych błędami losowymi jest analiza regresji [**L. 9**]. Umożliwia ona nie tylko oszacowanie wartości parametrów funkcji odwzorowującej zależność pomiędzy wielkościami przyjętymi jako zmienna zależna Y i wielkościami zmiennych niezależnych X, ale także oszacowanie ich istotności statystycznej oraz ocenę błędów odwzorowania.

Zgodnie z zasadami modelowania statystycznego dla badanych zestawów danych poszukiwano modeli istotnych statystycznie o istotnych statystycznie współczynnikach charakteryzujących się najlepszym odwzorowaniem danych. Jakość odwzorowania oceniano za pomocą współczynnika determinacji R^2 , który wskazuje, jaka część zmienności badanej zależności jest wyjaśniana (poprzez oszacowane równanie regresji) oraz współczynnika korelacji R oceniającego jakość dopasowania modelu regresyjnego do danych.

Na kolejnych rysunkach pokazano zidentyfikowane modele matematyczne, najlepsze według przedstawionych powyżej kryteriów. I tak na **Rys. 7** model zależności p_{oz} od zawartości dodatku AW, na **Rys. 8** od zawartości dodatku EP i dalej na **Rys. 9** model zależności G_{oz} od zawartości dodatku AW i na **Rys. 10** od zawartości dodatku EP w oleju bazowym.



Rys. 7. Wykres kwadratowej funkcji regresji zależności p_{oz} od zawartości dodatku AW
Fig. 7. Chart of quadratic function p_{oz} in dependence of AW additive

Tabela 1. Wartości parametrów statystycznych oceniających istotność modelu kwadratowego p_{oz}

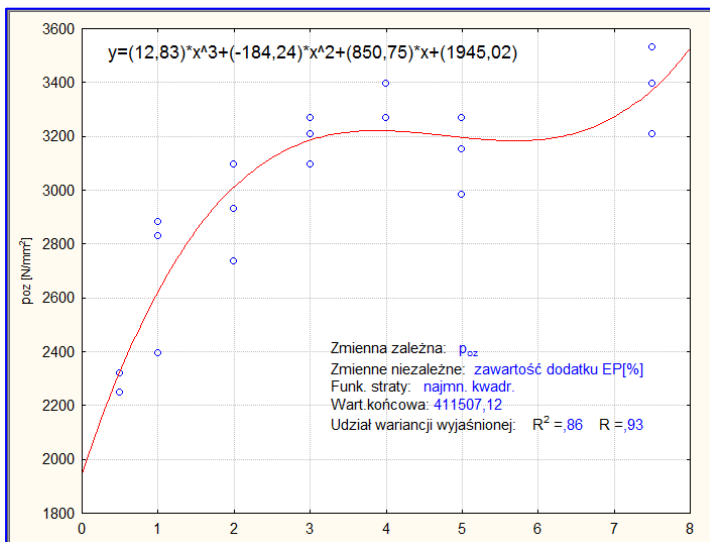
Table 1. The values of the statistical parameters that evaluate the significance of quadratic model p_{oz}

Model: $p_{oz} = a \cdot v_1^2 + b \cdot v_1 + c$						
Zmn. niezal. Dodatek AW [%]						
Poziom ufności: 95.0% ($\alpha = 0.050$)						
	Ocena	Błąd stand.	Wart. t df = 18	p	Doln. uf Granica	Górn. uf Granica
a	-14,85	3,07	-4,84	0,0001	-21,29	-8,41
b	270,88	24,89	10,88	0,0000	218,59	323,18
c	85,21	40,26	2,12	0,0485	0,63	169,79

Model kwadratowy przedstawiony na **Rys. 7** został przyjęty po odrzuceniu modelu liniowego, który wyjaśniał tylko 93% zmienności w porównaniu z modelami nieliniowymi, wielomianowymi drugiego i trzeciego stopnia, charakteryzującymi się bardzo dobrym dopasowaniem ($R^2 = 97\%$ i $R = 98\%$). Również zrezygnowano z modelu wielomianowego trzeciego stopnia po stwierdzeniu

istotności statystycznej tylko jednego z czterech jego współczynników. Natomiast wartości parametrów statystycznych pokazane w **Tabeli 1** potwierdziły istotność współczynników modelu kwadratowego co umożliwiło przyjęcie tego modelu jako najlepszego odwzorowania granicznego nacisku zatarcia p_{oz} w zależności od zawartości dodatku AW w środku smarowym.

Natomiast w przypadku zależności granicznego nacisku zatarcia p_{oz} w funkcji zawartości dodatku EP najlepszym okazał się model wielomianowy stopnia trzeciego pokazany na **Rys. 8**. Charakteryzuje się on dobrym dopasowaniem ($R^2 = 86\%$ i $R = 93\%$) oraz ma on wszystkie współczynniki istotne statystycznie, co potwierdzają wartości parametrów statystycznych tego modelu (**Tabela 2**).



Rys. 8. Wykres wielomianu 3 stopnia funkcji regresji zależności p_{oz} od % zawartości dodatku EP

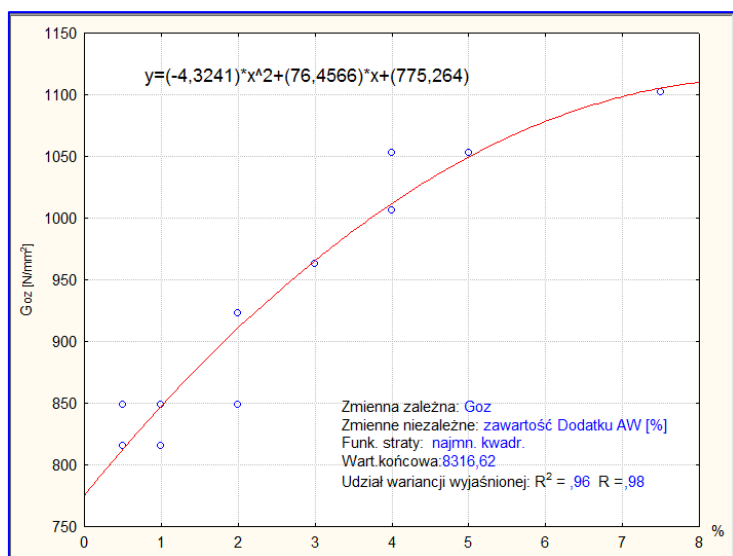
Fig. 8. Chart of cubic function p_{oz} in dependence of EP additive

Tabela 2. Wartości parametrów statystycznych oceniających istotność modelu trzeciego stopnia p_{oz}

Table 2. The values of the statistical parameters that evaluate the significance of cubic model p_{oz}

Model: $p_{oz} = a \cdot v_1^3 + b \cdot v_1^2 + c \cdot v_1 + d$						
Zmn. niezal. : Dodatek EP [%]						
Poziom ufności: 95.0% ($\alpha = 0.05$)						
	Ocena	Błąd stand.	Wart. t df = 17	p	Doln. uf Granica	Górn. uf Granica
a	12,83	4,49	2,86	0,0109	3,36	22,30
b	-184,24	54,11	-3,40	0,0034	-298,42	-70,07
c	850,75	176,19	4,83	0,0002	479,03	1222,47
d	1945,02	141,24	13,77	0,0000	1647,02	2243,01

W przypadku funkcji aproksymującej zależność G_{oz} od zawartości dodatku AW wartość współczynnika determinacji R^2 wzrasta wraz ze złożonością modelu, od wartości 92% dla modelu liniowego, poprzez 96% dla modelu kwadratowego (**Rys. 9**) aż do 97% dla modelu wielomianowego 3 stopnia. Niewielka różnica wartości współczynnika determinacji dla modeli nieliniowych daje rozstrzygającą rolę kryterium istotności statystycznej współczynników funkcji regresji oszacowanych na podstawie zgromadzonych wyników badań, które wykluczyło model 3 stopnia z powodu nieistotności statystycznej 3 spośród 4 współczynników. Wartości parametrów statystycznych potwierdzających istotność statystyczną modelu kwadratowego przedstawiono w **Tabeli 3**.



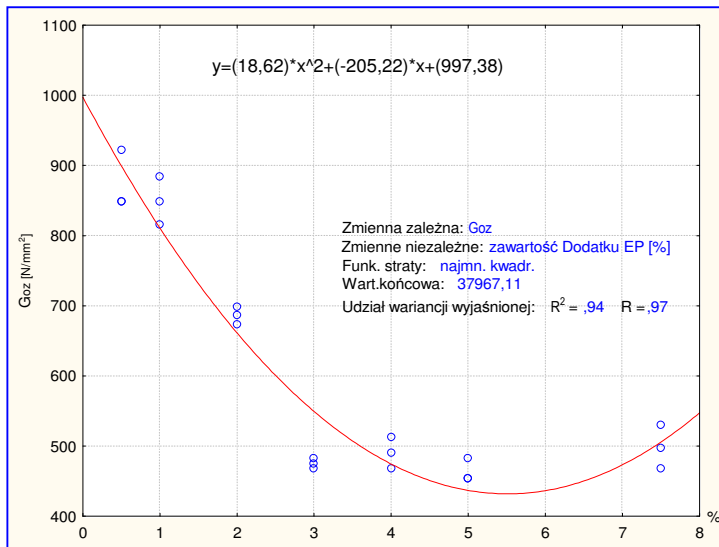
Rys. 10. Wykres kwadratowej funkcji regresji zależności G_{oz} od % zawartości dodatku AW
Fig. 10. Chart of quadratic function G_{oz} in dependence of AW additive

Tabela 3. Wartości parametrów statystycznych oceniających istotność modelu kwadratowego G_{oz}

Table 3. The values of the statistical parameters that evaluate the significance of quadratic model G_{oz}

Model: $G_{oz} = a \cdot v_1^2 + b \cdot v_1 + c$						
Zmn. niezal. : Dodatek AW [%]						
Poziom ufności: 95.0% ($\alpha = 0.050$)						
	Ocena	Błąd stand.	Wart. t df = 18	p	Doln. uf Granica	Górn. uf Granica
a	-4,32	0,94	-4,61	0,0002	-6,30	-2,35
b	76,46	7,62	10,04	0,0000	60,46	92,46
c	775,26	12,32	62,94	0,0000	749,38	801,14

Również w przypadku odwzorowania zależności granicznego obciążenia zużycia G_{oz} od zawartości dodatku EP najlepszym dopasowaniem charakteryzują się modele nieliniowe ($R^2 = 94\%$ i $R = 97\%$) wobec $R^2 = 64\%$ i $R = 80\%$ dla modelu liniowego. Także w tym przypadku tylko współczynniki modelu kwadratowego (Rys. 10) są istotne statystycznie na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ (Tabela 4).



Rys. 10. Wykres kwadratowej funkcji regresji zależności G_{oz} od % zawartości dodatku EP
Fig. 10. Chart of quadratic function G_{oz} in dependence of EP additive

Tabela 4. Wartości parametrów statystycznych oceniających istotność kwadratowego modelu G_{oz}

Table 4. The values of the statistical parameters that evaluate the significance of quadratic model G_{oz}

Model: $G_{oz} = a \cdot v_1^2 + b \cdot v_1 + c$						
Zmn. zal. : Dodatek EP [%]						
Poziom ufności: 95.0% ($\alpha = 0.050$)						
	Ocena	Błąd stand.	Wart. t df = 18	p	Doln. uf Granica	Górn. uf Granica
a	18,62	2,00	9,29	0,0000	14,41	22,83
b	-205,22	16,27	-12,61	0,0000	-239,40	-171,03
c	997,38	26,32	37,90	0,0000	942,09	1052,68

Ponadto wykorzystując metody estymacji nieliniowej opracowano modele: wykładniczy ($y = a \cdot \exp(b \cdot x)$) i logarytmiczne ($y = a + b \cdot \log(x)$) odwzorowania badanych własności tribologicznych (y) w zależności od zawartości dodatków AW/EP (x). Zestawienie wartości współczynnika determinacji R^2 dla opracowanych modeli pokazano w Tabeli 5.

Tabela 5. Zestawienie wartości współczynnika determinacji R^2 dla badanych modeli
 Table 5. Comparison of the coefficient of determination R^2 for the tested models

Wskaźnik	Dodatek	Model		
		wielomianowy	wykładniczy	logarytmiczny
p_{oz}	AW	$R^2 = 97\%$	$R^2 = 82\%$	$R^2 = 92\%$
p_{oz}	EP	$R^2 = 86\%$	$R^2 = 60\%$	$R^2 = 83\%$
G_{oz}	AW	$R^2 = 94\%$	$R^2 = 74\%$	$R^2 = 85\%$
G_{oz}	EP	$R^2 = 96\%$	$R^2 = 89\%$	$R^2 = 90\%$

Zestawienie wartości współczynnika determinacji dla różnego typu modeli uzasadnia wybór modeli wielomianowych jako modeli najlepiej odwzorowujących wpływ zawartości dodatków AW/EP w środku smarowym na jego własności tribologiczne mierzone wskaźnikami p_{oz} i G_{oz} .

PODSUMOWANIE

Zastosowanie metod analizy statystycznej umożliwiło identyfikację istotnych statystycznie zależności pomiędzy ilością dodatku AW lub EP w oleju bazowym a własnościami smarnymi wytworzonego środka smarowego, ocenianymi na podstawie wartości granicznego nacisku zatarcia p_{oz} oraz granicznego obciążenia zużycia G_{oz} . Dla zidentyfikowanych eksperymentalnie zależności p_{oz} i G_{oz} od zawartości datków AW lub EP w oleju opracowano wielomianowe modele regresyjne charakteryzujące się dobrym i bardzo dobrym dopasowaniem do badanych zbiorów danych – wyników testów tribologicznych, na podstawie których wyznaczono wartości p_{oz} i G_{oz} .

W przypadku zależności granicznego obciążenia zużycia G_{oz} od zawartości dodatku AW i EP opracowano modele wielomianowe stopnia 2. o wartości współczynnika determinacji R^2 na poziomie 94–96%. Również dla zależności granicznego nacisku zatarcia p_{oz} w funkcji zawartości dodatku AW otrzymano model kwadratowy o współczynniku determinacji $R^2 = 97$. Natomiast dla zależności p_{oz} w funkcji zawartości dodatku EP najlepszym okazał się model wielomianowy stopnia 3. o wartości współczynnika determinacji R^2 na poziomie 86%, a więc o lepszym dopasowaniu niż model kwadratowy ($R^2 = 80\%$).

Wszystkie opracowane modele są modelami wyjaśniającymi zależność właściwości smarnych kompozycji od zawartości w niej dodatku AW lub EP oraz wszystkie ich współczynniki są istotnymi statystycznie na przyjętym poziomie istotności 0,05.

LITERATURA

1. Burakowski T., Wierzchoń T.: Inżynieria powierzchni metali. WNT, Warszawa 1995.
2. Gahlin R., Larsson M., Hedenqvist P.: Me-C:H Coatings in Motor Vehicles. Wear, 2001, 249, s. 302–309.
3. Stachowiak G.W., Batchelor A.W.: Engineering Tribology – Second Edition. Butterworth-Heinemann, 2001, s. 744.
4. Kajdas Cz., Hiratsuka K.: Kataliza i tribokataliza. Tribologia, 2004, 2, s. 11–24.
5. Burakowski T., Marczak R.: Eksploatacyjna warstwa wierzchnia i jej badanie. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn. 1995, 3(103), s. 327–337.
6. Matuszewska A., Gradkowski M.: Antiwear Action of Mineral Lubricants Modified by Conventional and Unconventional Additives. Tribology Letters, 2007, 2(27), s. 177–180.
7. Matuszewska A., Gradkowski M., Makowska M.: Optymalizacja zawartości dodatków smarnych w modelowych kompozycjach smarowych. Tribologia, 2009, 3, s. 171–184.
8. Szczerek M., Tuszyński W.: Badania tribologiczne. Zacieranie. ITeE, Radom 2000.
9. Dobosz M.: Wspomagana komputerowo statystyczna analiza wyników badań. AOW Exit, Warszawa 2001.

Badania finansowane ze środków na naukę w ramach projektu badawczego nr N N504 698440 w latach 2011–2013.

Summary

The article presents the statistical analysis of research results concerning the influence of commercial antiwear additives on the tribological properties of lubricants that was produced based on mineral oil. The experiments were conducted with the use of a four-ball apparatus. The tribological properties of lubricants were assessed based on following indicators: a limiting pressure of seizure (p_{oz}) and a limiting load of the wear (G_{oz})

In the analysis, the influence of the additives on the p_{oz} and G_{oz} indicators was estimated. The statistically significant regression models of these relationships were developed.