

Ryszard RUTA *

MODELOWANIE WPLYWU ZAWARTOŚCI DODATKÓW AW I EP NA WŁAŚCIWOŚCI TRIBOLOGICZNE ŚRODKÓW SMAROWYCH

MODELING 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 kompozycji komercyjnych pakietów dodatków AW i EP na właściwości tribologiczne środków smarowych utworzonych na bazie oleju mineralnego. Oceny właściwości smarnych wytworzonych środków dokonano na podstawie wielkości granicznego obciążenia zużycia (G_{oz}) oraz granicznego nacisku zatarcia (p_{oz}) wyznaczonych za pomocą aparatu czterokulowego T-02. W rezultacie przeprowadzonych badań oszacowano wpływ kompozycji wybranych dodatków AW i EP na wartości charakterystyk G_{oz} i p_{oz} . Uzyskane wyniki umożliwiły opracowanie modeli regre-

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

syjnych, istotnych statystycznie, odwzorowujących wpływ zawartości wybranych dodatków przeciwzużyciowych i przeciwzatarciowych na właściwości tribologiczne środków smarnych wytworzonych na bazie mineralnego oleju bazowego.

WPROWADZENIE

Trwałość węzłów tarcia zdeterminowana jest rodzajem materiałów konstrukcyjnych, sposobem obróbki ich powierzchni oraz rodzajem zastosowanych środków smarowych. Wpływ warstwy wierzchniej na trwałość węzłów tarcia spowodowany jest faktem, że jest ona miejscem, w obrębie którego zachodzą wszystkie zjawiska i procesy związane ze zużywaniem i zacieraniem. Właściwości warstwy wierzchniej istotne ze względu na trwałość węzła kształtowane są na etapie wytwarzania elementów maszyn [L. 1–2]. Natomiast po eksploatacji, w warunkach tarcia granicznego i mieszanego 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 w trakcie eksploatacji [L. 6]. Zatem zmieniając skład chemiczny środka smarowego, można modyfikować skład warstwy wierzchniej, a w konsekwencji kształtować system tribologiczny w taki sposób, aby wykazywał on pożądaną odporność na zużywanie i zacieranie. Dlatego też dużym wyzwaniem dla technologów jest skomponowanie środka smarowego o odpowiednio dobranym składzie. Brak teorii wyjaśniającej wpływ właściwości fizykochemicznych środka smarowego na zjawiska i procesy zużycia i zacierania towarzyszące tarcia sprawił, że zasadniczym narzędziem doboru środka smarowego o pożądanym własnościach tribologicznych są odpowiednio zaprojektowane badania empiryczne. Mają one charakter iteracyjny i z reguły są czasochłonne i kosztowne.

Ich skuteczność zwiększa opracowanie modeli matematycznych, opisujących wpływ zawartości wybranych dodatków przeciwzużyciowych i przeciwzatarciowych w oleju na właściwości smarnej kompozycji wytworzonych z użyciem 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 dialkyloditifosforanach, 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 wprowadzono do mineralnego oleju bazowego w ilości od 0,5% do 7,5% wagowych i tak utworzoną kom-

pozycję 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]. Jako parametr charakteryzujący przeciwzużyciowe właściwości kompozycji smarowych stosowano wskaźnik G_{oz} , wyznaczony zgodnie z metodyką opisaną w normie PN-76/C-04147. Rezultaty testów zweryfikowano ze względu na możliwość wystąpienia wyników odstających za pomocą testu Q-Dixona przy 95% poziomie ufności.

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

W celu eksperymentalnej identyfikacji modelu matematycznego odwzorowującego wpływ kompozycji dodatków AW i EP na własności tribologiczne środka smarowego wykorzystano metody planowania doświadczeń dla mieszaniny z ograniczeniami na zawartość składników [L. 9]. Na podstawie wcześniejszych badań wpływu zawartości dodatku AW (EP) w środku smarowym wytworzonym na bazie oleju mineralnego określono zakresy dodatków w środku smarowym [L. 10]. Przyjęto minimalną i maksymalną zawartość dodatku AW w granicach [3%÷8%] i dodatku EP [1%÷4%].

Dla przyjętych zawartości granicznych dodatków wyznaczono plan eksperymentu sympleksowo-centroidowy, zawierający 4 wierzchołki V, 4 jednowymiarowe środki ciężkości c(1) i jeden dwuwymiarowy środek ciężkości C(2). Wygenerowany plan umożliwia wyznaczenie współczynników a_i , b_{ij} , c_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) oraz d_{123} modelu trzeciego stopnia (funkcji kubicznej) odwzorowującego wpływ zawartości składników x_i ($i=1, 2, 3$) na własności tribologiczne $y = (p_{oz}, G_{oz})$:

$$y = a_1 * x_1 + a_2 * x_2 + a_3 * x_3 + b_{12} * x_1 * x_2 + b_{13} * x_1 * x_3 + b_{23} * x_2 * x_3 + c_{12} * x_1 * x_2 * (x_1 - x_2) + c_{13} * x_1 * x_3 * (x_1 - x_3) + c_{23} * x_2 * x_3 * (x_2 - x_3) + d_{123} * x_1 * x_2 * x_3^1$$

¹ Uproszczona postać funkcji y trzeciego stopnia jest efektem uwzględnienia w pełnej postaci funkcji kubicznej zależności: $x_1 + x_2 + x_3 = 1$ oczywiście w przypadku mieszaniny trzech składników [x].

Wygenerowany plan z wartościami zawartości badanych składników w środku smarowym przedstawiono w **Tabeli 1**.

Tabela 1. Plan eksperymentu identyfikacyjnego

Table 1. The design for identification

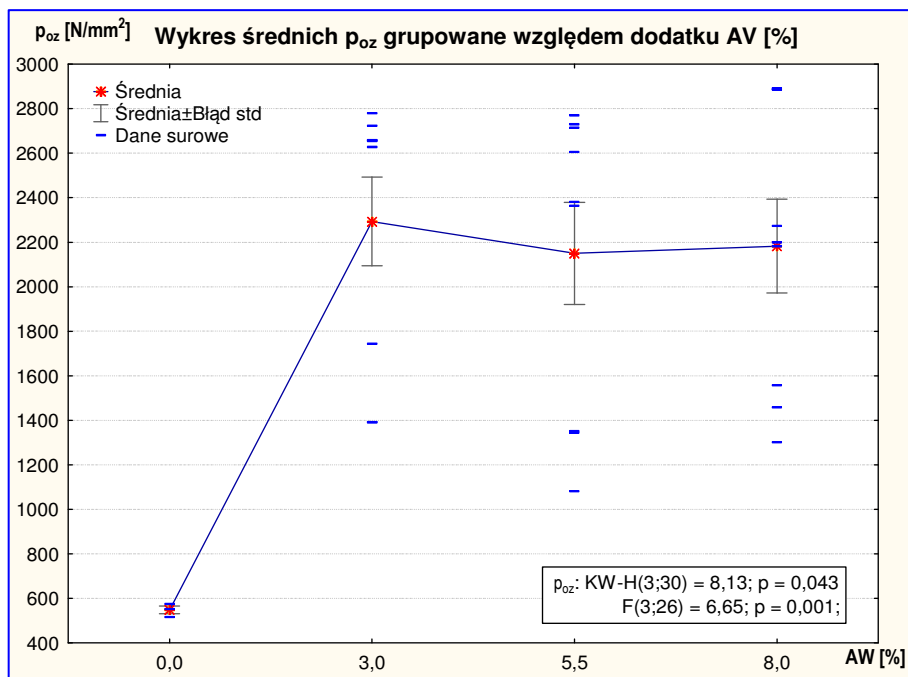
Wierzchołki (V) Środki ciężkości (C)	Plan eksperymentu Ograniczona mieszanina Liczba ograniczeń mieszaniny: 6		
	dodatek AW [%]	dodatek EP [%]	olej bazowy [%]
1 V	3,0	1,0	96,0
2 V	8,0	1,0	91,0
3 V	3,0	4,0	93,0
4 V	8,0	4,0	88,0
5 C(1)	3,0	2,5	94,5
6 C(1)	8,0	2,5	89,5
7 C(1)	5,5	1,0	93,5
8 C(1)	5,5	4,0	90,5
9 C(2)	5,5	2,5	92,0

W celu zwiększenia wiarygodności statystycznej wyników identyfikacji oraz uzyskania zależności istotnych statystycznie (na poziomie istotności $\alpha = 0,05$) zaplanowano dwukrotne powtórzenie wygenerowanego układu eksperymentów.

Budowę modeli matematycznych odwzorowujących wpływ zawartości dodatków AW i EP na własności tribologiczne poprzedzono analizą statystyczną wyników eksperymentów identyfikacyjnych.

W ramach analizy statystycznej zbadano istotność statystyczną wpływu zawartości dodatków na własności tribologiczne mierzone wartościami p_{oz} i G_{oz} . Wykresy obrazujące zależność wartości średnich p_{oz} i G_{oz} od zawartości dodatków AW i EP pokazano na **Rysunkach 1–4**. I tak na **Rys. 1** przedstawiono wartości średnie wraz z danymi surowymi granicznego nacisku zatarcia p_{oz} w zależności od zawartości dodatku AW w oleju bazowym przy pominięciu zawartości dodatku EP.

Jak wynika z danych przedstawionych na **Rys. 1**, zmiana zawartości dodatku AW w oleju (3–8%) powoduje znaczny przyrost wartości średniej p_{oz} (w stosunku do wartości p_{oz} oleju bazowego) przy bardzo dużym zróżnicowaniu poszczególnych wyników spowodowanym różną zawartością dodatku EP w badanych próbkach środka smarowego. 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} .

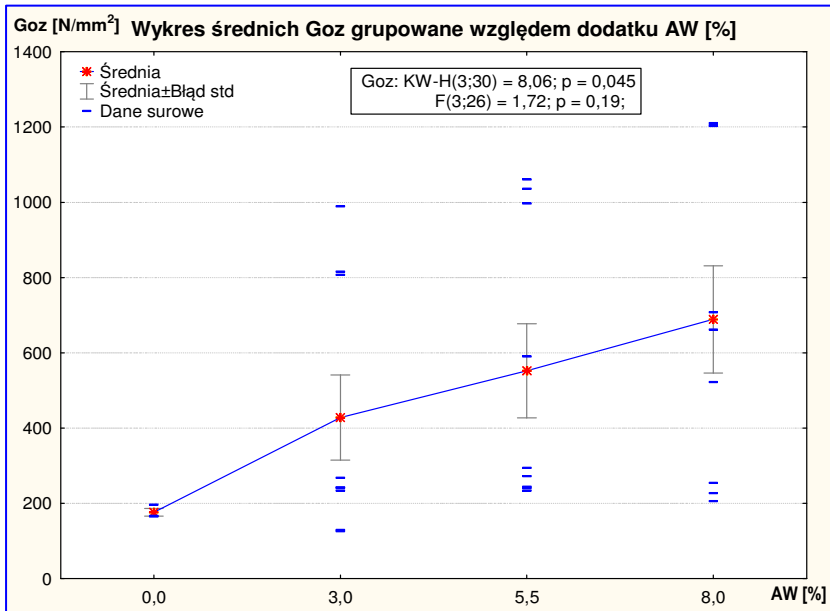


Rys. 1. Zależność wartości granicznego nacisku zatarcia p_{oz} od zawartości dodatku AW w oleju bazowym

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

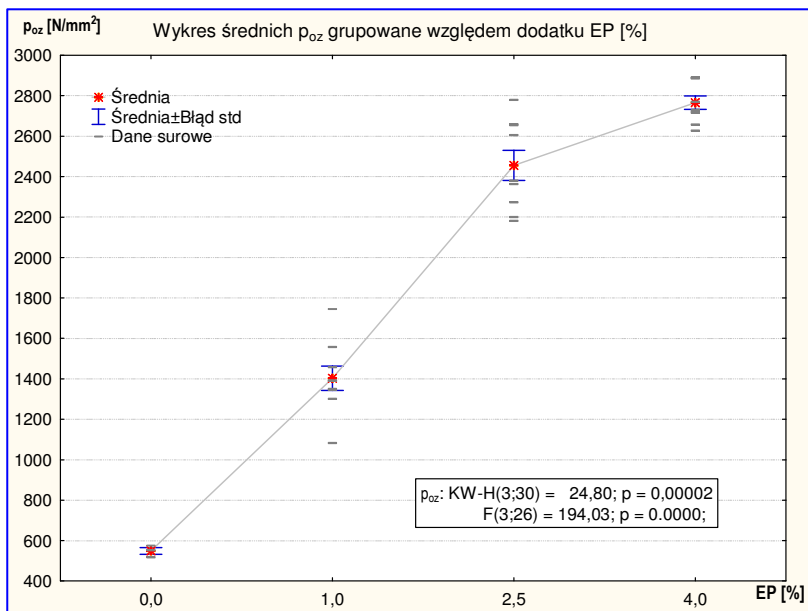
Odmienne zmienia się zależność średnich wartości granicznego obciążenia zużycia G_{oz} od zawartości dodatku AW w mineralnym oleju bazowym przedstawiona na **Rys. 2**. W tym przypadku 3% dodatku AW w oleju bazowym zwiększa działanie przeciwzużyciowe użytego oleju bazowego. Zwiększanie zawartości dodatku do 8% zapewnia monotoniczny przyrost wartości parametru G_{oz} . W tym przypadku także zaobserwować można duże zróżnicowanie poszczególnych wyników spowodowane zmienną zawartością dodatku EP. Ponieważ tylko wartości statystyki KH-W oraz wartość prawdopodobieństwa testowego p są mniejsze od 0,05, do przedstawionej zależności wpływu zawartości dodatku na badaną własność G_{oz} należy podchodzić z dużą rezerwą.

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 przy pominięciu zawartości dodatku AW. Jak można zaobserwować na wykresie, zwiększenie zawartości dodatku EP zwiększa średnią wartość p_{oz} przeszło dwukrotnie przy zawartości 1%, czterokrotnie przy zawartości 2,5% i cztery i pół razy przy zawartości 8%.



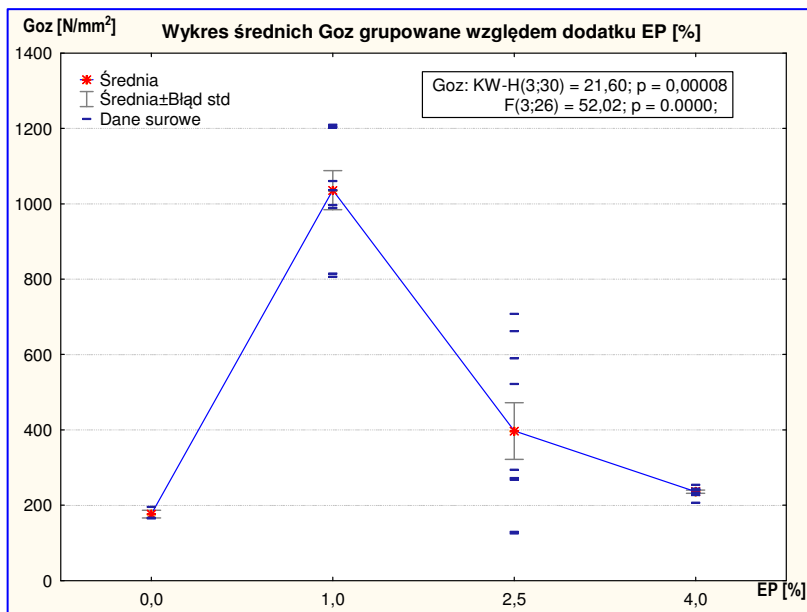
Rys. 2. Zależność wartości granicznego obciążenia zużycia G_{oz} od zawartości dodatku AW w oleju bazowym

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



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

Natomiast bardzo ciekawy przebieg ma zależność średniej wartości G_{oz} od zawartości dodatku EP w oleju bazowym, przedstawiona na wykresie (**Rys. 4**). Po pięciokrotnym wzroście ($G_{oz} = 1000$) działania przeciwzużyciowego przy 1% zawartości dodatku EP i gwałtownym spadku ($G_{oz} = 400$) przy zawartości 2,5% i jeszcze większym (prawie do poziomu czystego oleju) przy zawartości 4%.

Początkowy wzrost można wytłumaczyć działaniem przeciwzużyciowym dodatku AW wprowadzonym do środka smarowego razem z dodatkiem EP, o czym świadczy również duże zróżnicowanie wartości G_{oz} dla 1% zawartości dodatku EP. Zmniejszenie wartości średniej G_{oz} przy 2,5% zawartości dodatku EP świadczy o prozużyciowym działaniu dodatku EP zmniejszającym działanie przeciwzużyciowe dodatku AW. Przy 4% zawartości EP działanie przeciwzużyciowe dodatku AW jest prawie w całości zniwelowane (niezależnie od zawartości), o czym świadczy bardzo mały rozrzut wartości G_{oz} dla 4% zawartości dodatku EP

Zależności pokazane na wykresach (**Rys. 3 i 4**) są zależnościami istotnymi statystycznie na poziomie istotności $\alpha = 0,05$, o czym świadczą wartości statystyk F (Fischera) i rang KH-W (Kruskala-Wallisa) oraz wartości odpowiadających im prawdopodobieństw testowych p , mniejszych od 0,05.

MODELE MATEMATYCZNE

Podstawowym narzędziem budowy modelu matematycznego na podstawie wyników badań empirycznych obarczonych błędami losowymi jest analiza regresji [L. 9]. Wykorzystując narzędzia analizy regresji, można oszacować wartości parametrów funkcji odwzorowującej zależność pomiędzy wielkościami przyjętymi jako zmienna zależna Y i wielkościami zmiennych niezależnych X oraz zbadać ich istotność statystycznej, a także ocenić błąd odwzorowania.

Przedstawiony w **Tabeli 1** plan eksperymentów identyfikacyjnych przedstawia 9 środków smarowych różniących się zawartością dodatków, tak dobranych, aby była możliwość wyznaczenia kubicznej funkcji regresji odwzorowującej wpływ zawartości dodatków na własności tribologiczne badanego środka smarowego. Zgodnie z zasadami modelowania statystycznego dla wyznaczonych wartości wskaźników p_{oz} i G_{oz} środków smarowych poszukiwano modeli regresyjnych istotnych statystycznie, o istotnych statystycznie współczynnikach najdokładniej odwzorowujące wyniki empiryczne. Jakość odwzorowania oceniano za pomocą współczynnika korelacji wielowymiarowej R^2 , który wskazuje, jaka część zmienności badanej zależności jest wyjaśniana (poprzez oszacowane równanie regresji) oraz odpowiadający mu współczynnik skorygowany R^2 Popr. oceniający jakość dopasowania modelu regresyjnego do badanych danych niezależnie od liczby zmiennych niezależnych.

W przypadku granicznego nacisku zatarcia p_{oz} uzyskano dwa modele istotne statystycznie – liniowy i kwadratowy (**Tab. 2**).

Tabela 2. Wyniki analizy ANOVA modeli regresyjnych zmiennej p_{oz}

Table 2. Result of ANOVA analysis regression models variable p_{oz}

Model	ANOVA; Zmn.poz 3 Plan dla mieszaniny; suma mieszaniny=100., 30 ukła Sekwencyjne dopasow. modeli o rosnącej złożoności									
	SS Efekt	df Efekt	MS Efekt	SS Błąd	df Błąd	MS Błąd	F	p	R ²	R ² Skoryg.
Liniowe	15324620	2	7662310	2038600	27	75503.69	101,48	0,00	0,88	0,87
Kwadratow	1416409	3	472136	622191	24	25924.62	18,21	0,00	0,96	0,96
Całkow. kor.	17363220	29	598732							

Rezultaty analizy ANOVA uzasadniają wybór modelu kwadratowego jako modelu lepiej dopasowanego od modelu liniowego, o czym świadczą wartości współczynników determinacji obu modeli.

Wartości współczynników modelu kwadratowego wraz z ich oceną statystyczną pokazano w **Tabeli 3**.

Wartości parametrów statystycznych T(25) i p – oceniających współczynniki modelu kwadratowego zmiennej zależnej p_{oz} wskazują na istotność statystyczną wszystkich współczynników modelu kwadratowego:

$$p_{oz} = 5,65z - 16003,03y - 52,64x + 187,84xy + 172,43yz.$$

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

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

Wejśc.	Wsp. (składniki rzecz.); Zmn. poz; $R^2=,964$; Popr.:958 3 Plan dla mieszanki; suma mieszanki=100, 30 ukła ZZ poz; Resztowy MS=25229,75					
	Wsp.	Błąd std	t(25)	p	-95, % Gran.ufn	+95, % Gran.ufn
(x) dodatek AW [%]	-52,64	23,18	-2,27	0,03	-100,39	-4,89
(y) dodatek EP [%]	-16003,03	2355,38	-6,79	0,00	-20854,03	-11152,03
(z) olej bazowy [%]	5,65	0,86	6,59	0,00	3,88	7,42
xy	187,84	30,44	6,17	0,00	125,14	250,54
yz	172,43	24,46	7,05	0,00	122,05	222,81

W przypadku analizy wyników eksperymentów zaplanowanych dla mieszanin w ograniczonym obszarze zmienności składników wykorzystuje się przeskalowanie zawartości składników do postaci tzw. pseudoskładników v' ($v = x, y, z$), według zależności:

$$v' = (v - v_{\min}) / (100 - (x_{\min} + y_{\min} + z_{\min})),$$

gdzie:

v – zawartość v -tego składnika,

v_{\min} – dolne ograniczenie v -tego składnika.

Wykres warstwiczny modelu regresyjnego w funkcji pseudoskładników pokazano na **Rysunku 5**. Na wykresie w ramach pokazano rzeczywiste wartości p_{oz} , na podstawie których wyznaczono model regresyjny.

Natomiast podstawiając w modelu p_{oz} :

$$z = 100 - x - y,$$

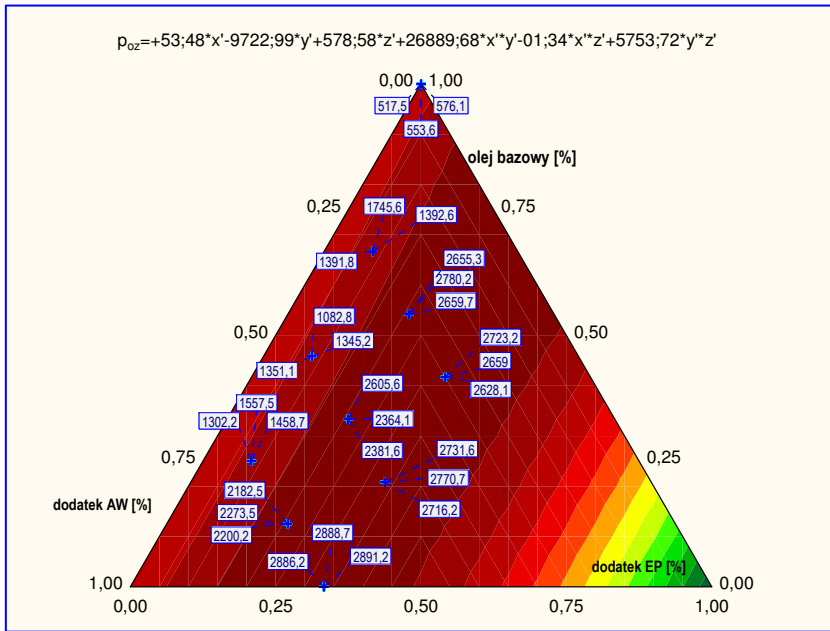
otrzymujemy model regresyjny p_{oz} w postaci równania kwadratowego dwóch zmiennych x (zawartość dodatku AW) i y (zawartość dodatku EP):

$$p_{oz} = 5,65 \cdot (100 - x - y) - 16003,03 \cdot y - 52,64 \cdot (100 - x - y) + 187,84 \cdot x \cdot y + 172,43 \cdot y \cdot (100 - x - y).$$

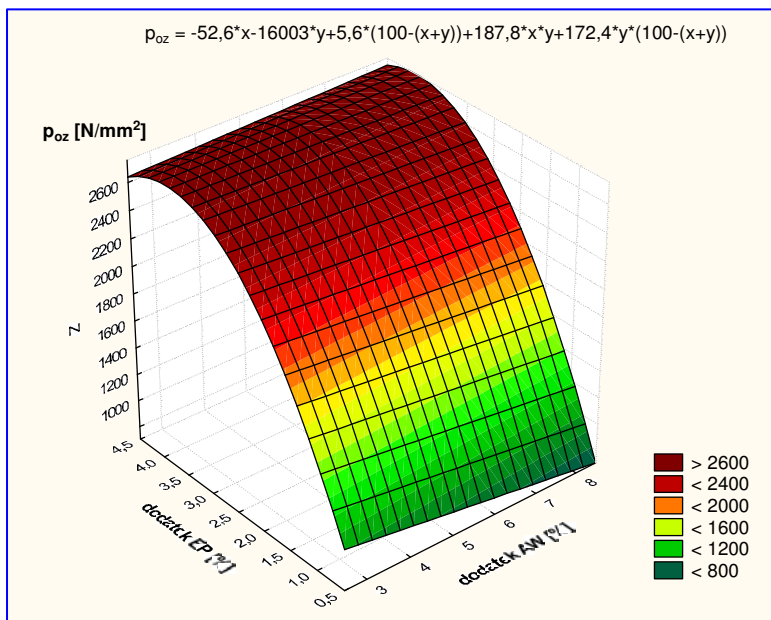
Wykres przestrzenny modelu regresyjnego w funkcji kwadratowej zawartości dodatków AW i EP pokazano na **Rysunku 6**.

W przypadku granicznego obciążenia zużycia G_{oz} uzyskano trzy modele istotne statystycznie liniowy, kwadratowy i sześcienny (**Tab. 4**).

Rezultaty analizy ANOVA uzasadniają wybór modelu sześciennego jako modelu lepiej dopasowanego od modeli liniowego i kwadratowego, o czym świadczą wartości współczynników determinacji obu modeli.



Rys. 5. Wykres kwadratowej funkcji regresji zależności p_{oz} od zawartości dodatków AW i EP
 Fig. 5. Chart of quadratic function p_{oz} in dependence of AW and EP additives



Rys. 6. Wykres kwadratowej funkcji regresji zależności p_{oz} od zawartości dodatków AW i EP
 Fig. 6. Chart of quadratic function p_{oz} in dependence of AW and EP additives

Tabela 4. Rezultaty analizy ANOVA modeli regresyjnych zmiennej G_{oz} Table 4. Results of the analysis of ANOVA regression models variable G_{oz}

Model	ANOVA; Zmn.:Goz 3 Plan dla mieszaniny; suma mieszaniny=100., 27 ukła (Niektóre efekty zostały usunięte z pełnych modeli)									
	SS Efekt	df Efekt	MS Efekt	SS Błąd	df Błąd	MS Błąd	F	p	R ²	R ² Skoryg.
Liniowe	3186626	2	1593313	638982,3	24	26624,26	59,84	0,000	0,83	0,82
Kwadratow	432857	3	144286	206125,4	21	9815,50	14,70	0,000	0,95	0,93
Specjal. kub.	26218	1	26218	179907,0	20	8995,35	2,91	0,103	0,95	0,94
Sześ.	60111	1	60111	119796,3	19	6305,07	9,53	0,006	0,97	0,96
Całkow. kor.	3825608	26	147139							

Wartości współczynników modelu sześciennego wraz z ich oceną statystyczną pokazano w **Tabeli 5**.

Tabela 5. Wartości parametrów statystycznych oceniających istotność modelu kubicznego G_{oz} Table 5. The values of the statistical parameters that evaluate the significance of cubic model G_{oz}

Wejśc.	Wsp. (składniki rzecz.); Zmn.:Goz; R ² =,969; Popr.:958 3 Plan dla mieszaniny; suma mieszaniny=100., 27 ukła ZZ Goz; Resztowy MS=6305,07					
	Wsp.	Błąd std	t(19)	p	-95,% Gran.ufn	+95,% Gran.ufn
(x) dodatek AW [%]	244,81	1052,94	0,23	0,819	-1959,02	2448,63
(y) dodatek EP [%]	23593,99	3937,29	5,99	0,000	15353,15	31834,83
(z) olej bazowy [%]	18,77	3,78	4,96	0,000	10,85	26,69
xy	-1476,13	397,75	-3,71	0,001	-2308,63	-643,62
xz	-2,70	11,79	-0,23	0,821	-27,38	21,98
yz	-249,82	41,41	-6,03	0,000	-336,49	-163,16
xyz	13,39	4,12	3,25	0,004	4,77	22,00
xy(x-y)	12,71	4,12	3,09	0,006	4,09	21,32

Analiza wartości oceniających istotność statystyczną współczynników modelu sześciennego zamieszczonych w **Tabeli 5** niepotwierdzających istotności dwóch z 8 współczynników modelu sześciennego, co w pewnym stopniu ogranicza zaufanie do tego modelu.

Następnym (wg **Tabeli 4**) modelem istotnym statystycznie jest model kwadratowy o współczynniku determinacji mniejszym tylko o 0,02 w stosunku do modelu kubicznego. Przy czym wartości parametrów statystycznych pokazane w **Tabeli 6** potwierdzają istotność statystyczną tego modelu, co uzasadnia przyjęcie funkcji:

$$G_{oz} = 120,92 \cdot x + 9970,68 \cdot y + 11,25 \cdot z - 129,32 \cdot x \cdot y - 106,31 \cdot y \cdot z$$

jako modelu najlepiej odwzorowującego wpływ zawartości kompozycji dodatków AW i EP na własności przeciwdrożdżyciowe badanego środka smarowego.

Tabela 6. Wartości parametrów statystycznych oceniających istotność modelu kwadratowego G_{oz}

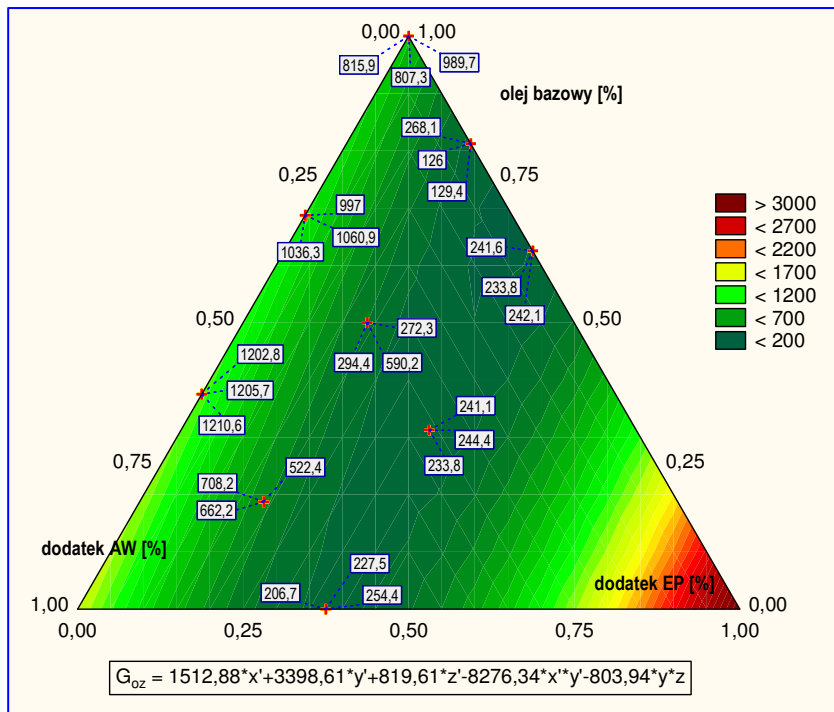
Table 6. The values of the statistical parameters that evaluate the significance of quadratic model G_{oz}

Wejśc.	Wsp. (składniki rzecz.); Zmn.:Goz; R ² = ,946;Popr.:936 3 Plan dla mieszaniny; suma mieszaniny=100,, 27 ukła ZZ Goz; Resztowy MS=9380,12					
	Wsp.	Błąd std	t(22)	p	-95,% Gran.ufn	+95,% Gran.ufn
(x) dodatek AW [%]	120,92	19,64	6,16	0,000	80,19	161,64
(y) dodatek EP [%]	9970,68	1670,81	5,97	0,000	6505,62	13435,74
(z) olej bazowy [%]	11,25	1,48	7,62	0,000	8,19	14,31
xy	-129,32	19,09	-6,77	0,000	-168,91	-89,73
yz	-106,31	17,57	-6,05	0,000	-142,76	-69,87

Wykorzystując przedstawione powyżej przeskalowanie zawartości składników do postaci tzw. pseudoskładników, otrzymujemy model:

$$G_{oz} = 1512,88*x'+3398,61*y'+819,61*z'-8276,34*x'*y'-803,94*y'*z',$$

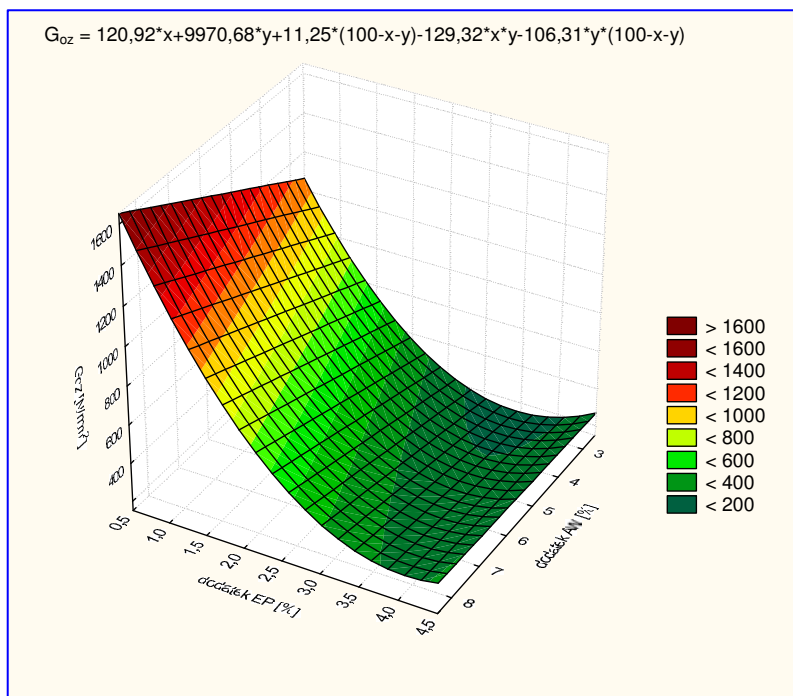
którego trójkątny wykres warstwicowy pokazano na **Rysunku 7**. Na tym wykresie w prostokątach podano wyznaczone eksperymentalnie wartości G_{oz} , na podstawie których wyznaczono funkcję regresji.



Rys. 7. Wykres kwadratowej funkcji regresji zależności G_{oz} od % zawartości dodatków AW i EP
Fig. 7. Chart of quadratic function G_{oz} in dependence of AW and EP additives

Natomiast na **Rysunku 8** pokazano wykres przestrzenny granicznego obciążenia zużycia w funkcji zawartości dodatków AW i EP:

$$G_{oz} = 120,92*x+9970,68*y+11,25*(100-x-y)-129,32*x*y-106,31*y*(100-x-y).$$



Rys. 8. Wykres kwadratowej funkcji regresji zależności G_{oz} od % zawartości dodatków AW i EP

Fig. 8. Chart of quadratic function G_{oz} in dependence of of AW and EP additives

PODSUMOWANIE

Zastosowanie metod analizy statystycznej umożliwiło identyfikację istotnych statystycznie zależności pomiędzy ilością kompozycji dodatków AW i EP w mineralnym oleju bazowym a własnościami smarowymi 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 i EP w oleju opracowano kwadratowe i kubiczne modele regresyjne charakteryzujące się bardzo dobrym dopasowaniem do badanych zbiorów danych – wyników testów tribologicznych, na podstawie których wyznaczono wartości p_{oz} i G_{oz} .

W przypadku wpływu zawartości kompozycji dodatków AW i EP na wartość granicznego nacisku zatarcia p_{oz} wyznaczono dwa modele istotne staty-

stycznie: liniowy w współczynniku determinacji R^2 na poziomie 88% i kwadratowy o współczynniku determinacji 96%. Ponieważ w modelu kwadratowym wszystkie wyznaczone współczynniki funkcji regresji okazały się istotnymi statystycznie, funkcję kwadratową wybrano jako model matematyczny najlepiej opisujący zależność p_{oz} od zawartości kompozycji dodatków AW i EP.

Dla zależności wartości granicznego obciążenia zużycia G_{oz} w funkcji zawartości kompozycji dodatków AW i EP otrzymano trzy modele istotne statystycznie: liniowy o współczynniku determinacji $R^2 = 83\%$, kwadratowy o $R^2 = 95\%$ i kubiczny $R^2 = 97\%$. Ponieważ w sześcienniej funkcji regresji dwa z ośmiu współczynników okazały się nieistotnymi statystycznie, jako model matematyczny opisujący zależność G_{oz} od zawartości kompozycji dodatków AW i EP wybrano model kwadratowy o wszystkich współczynnikach istotnych statystycznie i bardzo dobrym dopasowaniu do danych doświadczalnych.

Wszystkie opracowane modele są modelami istotnymi statystycznie o wszystkich istotnych współczynnikach (na przyjętym poziomie istotności 0,05) wyjaśniającymi zależność właściwości tribologicznych wytworzonych środków smarowych od zawartości kompozycji dodatków AW i EP.

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, 302–309.
3. Stachowiak G.W., Batchelor A.W.: *Engineering Tribology – Second Edition*. Butterworth-Heinemann, 2001, 744.
4. Kajdas Cz., Hiratsuka K.: Kataliza i tribokataliza. *Tribologia*, 2004, 2, 11–24.
5. Burakowski T., Marczak R.: Eksploatacyjna warstwa wierzchnia i jej badanie. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn*. 1995, 3(103), 327–337.
6. Matuszewska A., Gradkowski M.: Antiwear Action of Mineral Lubricants Modified by Conventional and Unconventional Additives. *Tribology Letters*, 2007, 2(27), 177–180.
7. Matuszewska A., Gradkowski M., Makowska M.: Optymalizacja zawartości dodatków smarnych w modelowych kompozycjach smarowych. *Tribologia*, 2009, 3, 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.
10. Ruta R., Matuszewska A., Gradkowski M., Makowska M.: Modelowanie wpływu dodatków AW/EP na właściwości tribologiczne środków smarowych. *Tribologia*, 2013, 2, 169–182.
11. StatSoft (2006). *Elektroniczny Podręcznik Statystyki PL*, Kraków, WEB: <http://www.statsoft.pl/textbook/stathome.html>.

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 the research results concerning the influence of the commercial AW and EP additives on the tribological properties of lubricant that was produced based on mineral oil. The experiments were conducted with the use of a four-ball machine. The tribological properties of lubricants were assessed based on a limiting load of the wear (G_{oz}) and limiting pressure of seizure (p_{oz}). The influence of additives' content on the p_{oz} and G_{oz} parameters was estimated. Using the obtained results, the statistically significant regression models of these relationships were developed.