

Ryszard RUTA*, Ewa PAWELEC*, Elżbieta SIWIEC*

WPLYW ZAWARTOŚCI DODATKÓW AW I EP NA WŁAŚCIWOŚCI TRIBOLOGICZNE ŚRODKÓW SMAROWYCH

EFFECTS OF THE CONTENT OF AW AND EP ADDITIVES ON TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF LUBRICANTS

Słowa kluczowe:

kompozycje smarowe, dodatki smarne, zacieranie, zużycie

Key words:

lubricant compositions, lubricant additives, scuffing, wear

Streszczenie

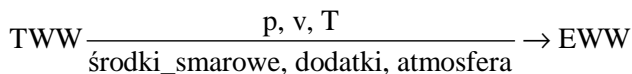
W artykule przedstawiono wykorzystanie statystycznych metod planowania eksperymentów dla mieszanin z ograniczeniami do identyfikacji wpływu kompozycji komercyjnych pakietów dodatków AW i EP na właściwości tribologiczne środków smarowych utworzonych na bazie oleju estrowego. Jako podstawowe właściwości tribologiczne badanych środków smarowych przyjęto wielkości granicznego obciążenia zużycia (G_{oz}) oraz granicznego nacisku zatarcia (p_{oz}) wyznaczone 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} . W rezultacie przeprowadzo-

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

nych badań opracowano istotne statystycznie modele regresyjnych, odwzorowujących wpływ zawartości wybranych dodatków przeciwzużyciowych i przeciwwzartarciowych na właściwości tribologiczne środków smarowych wytworzonych na bazie oleju estrowego.

WPROWADZENIE

Nowoczesne, wysokojakościowe środki smarowe są kompozycjami zawierającymi w swoim składzie wiele składników zapewniających realizację minimalnego zużycia w układach o znacznej intensyfikacji wymuszeń [L. 1–2]. W wielu aplikacjach wysokojakościowa baza olejowa nie jest w stanie zapewnić minimalnego zużycia smarowanego węzła tarcia i z tego też względu niezbędnym staje się dobór dodatków redukujących tarcie i zużycie. Stosowanie dodatków AW/EP jest uzasadnione w przypadku, gdy węzeł tarcia pracuje w zakresie wysokich obciążeń i prędkości obrotowych. Wówczas w wyniku interakcji przebiegającej w warstwie wierzchniej pomiędzy aktywnymi składnikami dodatków i materiałem węzła tarcia następuje ukonstytuowanie się eksploatacyjnej warstwy wierzchniej łagodzącej skutki tarcia i zużycia. Burakowski T. i Marczak R. zaproponowali reakcję takiej przemiany według poniższego schematu [L. 3].



Mechanizm smarowania przebiega wówczas z wykorzystaniem warstw protektorowych zapobiegających zacieraniu [L. 4–6]. Ich skuteczność jest uwarunkowana dynamiką ich tworzenia i zdolnością do odbudowywania w warunkach intensywnych wymuszeń tribologicznych.

Dotychczas w technice brak jest czytelnych reguł opartych na zastosowaniu aparatu matematycznego do efektywnego komponowania środków smarowych. Identyfikacja złożonych zależności między zawartością dodatków a badanymi własnościami projektowanego środka smarowego w postaci wiarygodnego i adekwatnego modelu matematycznego dostarcza narzędzia umożliwiającego prognozowanie badanych własności w zależności od zawartości dodatków i tym samym dobór takiej zawartości dodatków, która umożliwi uzyskanie pożądanego poziomu badanych własności.

PRZEDMIOT I METODY BADAŃ

Przedmiotem badań były środki smarowe tworzone na bazie oleju estrowego za pomocą zestawów komercyjnych dodatków AW i EP. Bazowy olej estrowy charakteryzowały następujące własności fizykochemiczne: wskaźnik lepkości 136 (lepkość kinematyczna w temp. 40°C, – 19,6 [mm/s²], a w 100°C – 4,3 [mm/s²]),

liczba kwasowa 0,07 [mg KOH/g oleju], liczba jodowa 0,5 [mg J/g oleju] oraz o następujących własnościach tribologicznych: średniej wartości granicznego obciążenia zużycia $p_{oz} = 552,60$ [N/mm²] i średniej wartości granicznego nacisku zatarcia $G_{oz} = 177,78$ [N/mm²]. Zastosowany w badaniach dodatek AW o działaniu przeciwzużyciowym 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%. Na podstawie wcześniejszych badań [L. 7] dotyczących wpływu zawartości poszczególnych pakietów dodatków na własności tribologiczne środka smarowego zawartość dodatków ograniczono do przedziału 3÷8% wagowych dodatku AW i 1÷4% dodatku EP. Konkretnie wartości zestawów dodatków w środku smarowym wyznaczono metodami planowania eksperymentów dla mieszanin z ograniczeniami i tak utworzoną kompozycję homogenizowano poprzez mechaniczne mieszanie.

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

Na potrzeby identyfikacji wpływu zawartości składników na określone własności ich mieszaniny w ramach statystycznych metod planowania eksperymentów opracowano zestawy układów eksperymentów umożliwiające minimalizację liczby doświadczeń koniecznych do identyfikacji współczynników poszukiwanej postaci funkcji modelu matematycznego odwzorowującego poszukiwaną zależność [L. 9]. Przy czym minimalna liczba eksperymentów identyfikacyjnych uzależniona jest o stopnia wielomianu identyfikowanej funkcji – im wyższy stopień, tym większa liczba koniecznych doświadczeń. Ze względu na nieliniowy przebieg identyfikowanych zależności wpływu kompozycji dodatków AW i EP na własności tribologiczne środka smarowego dla przyjętych zawartości granicznych dodatków wyznaczono plan eksperymentu sympleksowo-cen-

troidowy zawierający 4 wierzchołki V, 4 jednowymiarowe środki ciężkości c(1) i jeden dwuwymiarowy środek ciężkości C(2), które umożliwiają wyznaczenie współczynników modelu trzeciego stopnia odwzorowującego wpływ zawartości składników na własności tribologiczne (p_{oz} , G_{oz}). 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.

MODELE MATEMATYCZNE

Budowa modelu matematycznego na podstawie wyników eksperymentów wykonanych według przyjętego planu (**Tab. 1**) to w praktyce analiza regresji wielokrotnej z zerowym wyrazem wolnym będącym konsekwencją warunku integralności dla mieszaniny (suma składników jest wielkością stałą) [**L. 9**]. Zatem poszukiwanie modelu odwzorowującego zależność pomiędzy wielkościami przyjętymi jako zmienna zależna Y i wielkościami zmiennych niezależnych X oraz zbadanie ich istotności statystycznej wymaga zastosowania analizy wariancji ANOVA.

Wyniki analizy ANOVA granicznego nacisku zatarcia p_{oz} pokazano w **Tabeli 2**, zaś dla granicznego obciążenia zużycia G_{oz} w **Tabeli 4**.

Tabela 2. Wyniki analizy ANOVA modeli regresyjnych zmiennej p_{oz} Table 2. Result of ANOVA analysis regression models variable p_{oz}

Model - wielomian	ANOVA; Zmn. p_{oz} 3 Plan dla mieszaniny; suma mieszaniny = 100, 27 układów									
	SS Efekt	df Efekt	MS Efekt	SS Błąd	df Błąd	MS Błąd	F	p	R ²	R ² Skoryg.
stopnia 1	18630828	2	9315414	3222214	24	134258,9	69,38	0,00	0,85	0,84
stopnia 2	1816887	3	605629	1405328	21	66920,4	9,05	0,00	0,94	0,92
niepełny stopnia 3	112786	1	112786	1292541	20	64627,1	1,75	0,20	0,94	0,92
stopnia 3	874140	1	874140	418401	19	22021,1	39,70	0,00	0,98	0,97
Całkow. kor.	21853042	26	840502							

Na podstawie rezultatów analizy ANOVA można stwierdzić możliwość odwzorowania wyników eksperymentów wielomianami stopnia 1, 2, i 3, istotnymi statystycznie (na przyjętym poziomie istotności $\alpha = 0,05$)², o bardzo dobrym dopasowaniu do wyników badań granicznego nacisku zatarcia p_{oz} . Zgodnie z zasadami analizy ANOVA miarą oceny stopnia dopasowania modelu jest współczynnik korelacji wielowymiarowej R^2 , który wskazuje, jaka część zmienności badanej zależności jest wyjaśniana (poprzez oszacowane równanie regresji) oraz odpowiadający mu współczynnik skorygowany R^2 oceniający jakość dopasowania modelu regresyjnego do badanych danych niezależnie od liczby zmiennych niezależnych. Modelem najlepiej dopasowanym do wyników badań jest model o bardzo wysokiej wartości $R^2 = 0,98$. Również model w postaci wielomianu stopnia 2 charakteryzuje się bardzo dobrym dopasowaniem ($R^2 = 0,94$).

W przypadku analizy wyników badań z powtórzeniami ocenia się wartość tzw. czystego błędu oraz ocenę ogólnego braku dopasowania (patrz **Tab. 3 i 4**). Czysty błąd ocenia zmienność wielkości wyjściowej dla identycznych wartości wejściowych to błąd pochodzący całkowicie od niepewności pomiaru wielkości wyjściowej. Ponieważ błąd całkowity jest sumą błędu czystego i braku dopasowania zidentyfikowanego modelu, bada się, czy ten brak dopasowania jest istotnie (statystycznie) większy od błędu czystego. Jeżeli tak jest, to należy uznać, że w dalszym ciągu nie cała zmienność pomiędzy badanymi zestawami wartości jest wyjaśniana przez model, a więc występuje ogólny brak dopasowania badanego modelu. W przypadku badanego modelu stopnia 3 brak dopasowania nie jest wielkością istotną statystycznie, o czym świadczy wartość prawdopodobieństwa testowego $p = 0,76$ (wiersz zaznaczony w **Tab. 3**) większa od przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0,05$.

² Poza modelem w postaci niepełnego wielomianu stopnia 3, o czym świadczy wartość prawdopodobieństwa testowego $p = 0,20 > 0,05$.

Tabela 3. Wartości parametrów statystycznych oceniających ogólne dopasowanie modelu p_{oz} w postaci wielomianu stopnia 3

Table 3. The value of statistical parameters to assess the overall fit of the model p_{oz} with with polynomial of degree 3

Źródło	Ogólne dopasowanie modelu zm.: p_{oz} w postaci wielomianu stopnia 3				
	SS	df	M	F	p
Model	21434641	7	3062092	139,05	0,00
Błąd całk.	418401	19	22021		
Brak dopas.	2199	1	2199	0,10	0,76
Czysty bł.	416203	18	23122		
Całkow. kor.	21853042	26	840502		

Tabela 4. Wartości parametrów statystycznych oceniających ogólne dopasowanie modelu p_{oz} w postaci wielomianu stopnia 2

Table 4. The value of statistical parameters to assess the overall fit of the model p_{oz} with with polynomial of degree 2

Źródło	Ogólne dopasowanie modelu p_{oz} w postaci wielomianu stopnia 2				
	SS	df	M	F	p
Model	20447715	5	4089543	61,11	0,000
Błąd całk.	1405328	21	66920		
Brak dopas.	989125	3	329708	14,26	0,000
Czysty bł.	416203	18	23122		
Całkow. kor.	21853042	26	840502		

Porównując wartości parametrów oceniających ogólne dopasowanie modeli zawarte w **Tabelach 3 i 4**, można stwierdzić, że tylko model wielomianowy stopnia 3 jest modelem adekwatnym do odwzorowania wyników badań wartości p_{oz} .

Następnie zbadano istotność statystyczną współczynników modelu kubicznego. Wartości współczynników modelu stopnia 3 wraz z ich oceną statystyczną pokazano w **Tabeli 5**.

Wartości parametrów statystycznych testu t-Studenta $t(19)$ i p – oceniających współczynniki modelu kubicznego zmiennej zależnej p_{oz} wskazują na istotność statystyczną 6 współczynników modelu kubicznego i nieistotność dwóch.

Tabela 5. Wartości parametrów statystycznych oceniających istotność współczynników modelu p_{oz} w postaci wielomianu stopnia 3

Table 5. The values of the statistical parameters that evaluate the significance of the model p_{oz}

Wejście:	Współczynniki funkcji regresji Zmn.: P_{oz} ; $R^2=,98$; Popr.:97 ZZ p_{oz} ; Resztowy MS=22021,12					
	Wsp.	Błąd std	t(19)	p	-95,% Gran.ufn	+95,% Gran.ufn
(x) dodatek AW [%]	2528,08	1967,79	1,28	0,21	-1590,54	6646,71
(y) dodatek EP [%]	-67965,05	7358,21	-9,24	0,00	-83365,95	-52564,14
(z) olej bazowy [%]	-19,07	7,07	-2,70	0,01	-33,88	-4,27
xy	4204,38	743,34	5,66	0,00	2648,55	5760,22
xz	-25,15	22,03	-1,14	0,27	-71,27	20,96
BC	718,60	77,38	9,29	0,00	556,63	880,57
xyz	-38,16	7,69	-4,96	0,00	-54,26	-22,06
xy(x-y)	-48,46	7,69	-6,30	0,00	-64,56	-32,36

Tabela 6. Wartości parametrów statystycznych oceniających istotność współczynników zmodyfikowanego modelu p_{oz}

Table 6. The values of the statistical parameters that evaluate the significance of the modified model p_{oz} with with polynomial of degree 3

Wejście:	Współczynniki funkcji regresji Zmn.: p_{oz} ; $R^2=,98$; Popr.:97 ZZ p_{oz} ; Resztowy MS=22354,92					
	Wsp.	Błąd std	t(20)	p	-95,% Gran.ufn	+95,% Gran.ufn
(x) dodatek AW [%]	283,02	66,92	4,23	0,000	143,43	422,61
(y) dodatek EP [%]	-67759,98	7411,56	-9,14	0,000	-83220,22	-52299,75
(z) olej bazowy [%]	-25,64	4,15	-6,17	0,000	-34,30	-16,97
xy	4545,96	685,60	6,63	0,000	3115,83	5976,09
yz	718,60	77,97	9,22	0,000	555,96	881,24
xyz	-42,22	6,87	-6,14	0,000	-56,56	-27,88
xy(x-y)	-44,40	6,87	-6,46	0,000	-58,74	-30,07

Po usunięciu z modelu współczynnika przy zmiennej xy otrzymano model:

$$p_{oz} = 283,02x - 67759,98y - 25,64z + 4545,96xy + 718,6yz - 42,22xyz - 44,4xy(x-y)$$

o wszystkich współczynnikach istotnych statystycznie, o czym świadczą wartości parametrów statystycznych oceniających istotność statystyczną współczynników funkcji regresji pokazanych w **Tabeli 6**.

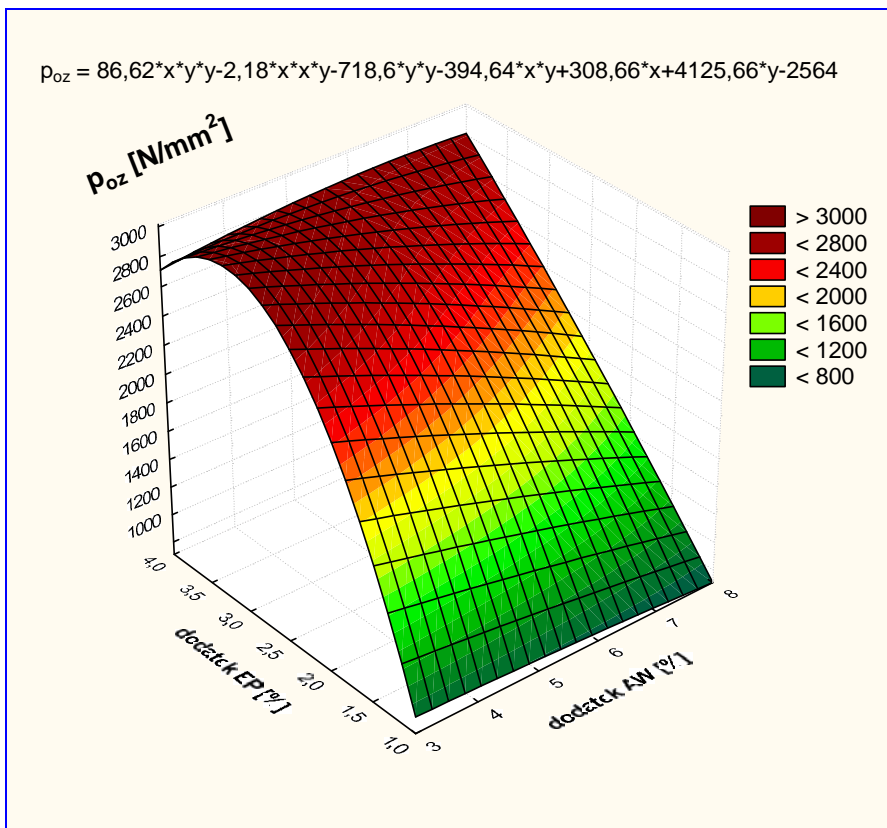
Podstawiając w modelu p_{oz} :

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

otrzymujemy model regresyjny p_{oz} w postaci funkcji wielomianowej 3 stopnia dwóch zmiennych x (zawartość dodatku AW) i y (zawartość dodatku EP):

$$p_{oz} = 86,62xy^2 - 2,18x^2y - 718,6y^2 - 394,64xy + 308,66x + 4125,66y - 2564.$$

Wykres 3D modelu regresyjnego wpływu zawartości dodatków AW i EP na wartość p_{oz} pokazano na **Rysunku 2**.



Rys. 1. Wykres 3D funkcji regresji zależności p_{oz} od zawartości dodatków AW i EP

Fig. 1. Chart 3D of the regression function p_{oz} in dependence of the contents of AW and EP additives

Na podstawie analizy funkcji regresji stwierdzono negatywny wpływ zawartości dodatku AW na własności przeciwwzarciove środka smarowego – funkcja p_{oz} osiąga maksymalną wartość przy minimalnej zawartości dodatku AW przy zawartości 3,2% dodatku przeciwwzarciovego EP.

W przypadku granicznego obciążenia zużycia G_{oz} uzyskano trzy modele wielomianowe stopnia 1, 2 i 3 istotne statystycznie (**Tab. 7**). Na uwagę zasługują modele: niepełny trzeciego stopnia odwzorowujący aż 93% zmienności wyników badań i model stopnia 2 również o bardzo wysokim współczynniku korelacji $R^2 = 90$. Na podstawie wartości parametrów statystycznych (**Tab. 8, 9**) oceniających ogólne dopasowanie tych modeli można stwierdzić adekwatność obu modeli do opisu zależności G_{oz} od zawartości badanych dodatków.

Tabela 7. Rezultaty analizy ANOVA modeli regresyjnych zmiennej G_{oz}
 Table 7. Results of the analysis of ANOVA regression models variable G_{oz}

Model:	ANOVA; Zmn.: G_{oz} 3 Plan dla mieszaniny; suma mieszaniny = 100, 27 układów									
	SS Efekt	df Efekt	MS Efekt	SS Błąd	df Błąd	MS Błąd	F	p	R [^]	R [^] Skoryg
stopnia 1	252435,4	2	126217,7	167550,8	24	6981,3	18,08	0,00	0,60	0,57
stopnia 2	127042,5	3	42347,5	40508,3	21	1929,0	21,95	0,00	0,90	0,88
niepełny stopnia 3	10868,2	1	10868,2	29640,1	20	1482,0	7,33	0,01	0,93	0,91
pełny stopnia 3	1523,4	1	1523,4	28116,7	19	1479,8	1,03	0,32	0,93	0,91
Całkow. kor.	419986,2	26	16153,3							

Tabela 8. Wartości parametrów statystycznych oceniających ogólne dopasowanie modelu G_{oz} z niepełnym wielomianem stopnia 3

Table 8. The value of statistical parameters to assess the overall fit G_{oz} of polynomial of degree 3

Źródło	Ogólne dopasowanie modelu G_{oz} w postaci niepełnego wielomianu stopnia 3				
	SS	df	MS	F	p
Model	391869,5	7	55981,4	37,83	0,00
Błąd całk.	28116,7	19	1479,8		
Brak dopas.	1402,9	1	1402,9	0,95	0,34
Czysty bł.	26713,8	18	1484,1		
Całkow. kor.	419986,2	26	16153,3		

Tabela 9. Wartości parametrów statystycznych oceniających ogólne dopasowanie modelu G_{oz} z niepełnym wielomianem stopnia 2

Table 9. The value of statistical parameters to assess the overall fit of the model G_{oz} with polynomial of degree 2

Źródło	Ogólne dopasowanie modelu G_{oz} w postaci niepełnego wielomianu stopnia 2				
	SS	df	MS	F	p
Model	379477,9	5	75895,58	39,35	0,00
Błąd całk.	40508,3	21	1928,97		
Brak dopas.	13794,5	3	4598,17	3,10	0,05
Czysty bł.	26713,8	18	1484,10		
Całkow. kor.	419986,2	26	16153,31		

W dalszym ciągu zbadano istotność współczynników modeli z niepełnym wielomianem stopnia 3 (**Tab. 10**) oraz modelu wielomianowego stopnia 2 (**Tab. 11**).

Tabela 10. Wartości parametrów statystycznych oceniających istotność modelu G_{oz} z niepełnym wielomianem stopnia 3

Table 10. The values of the statistical parameters evaluating the significance of the model G_{oz} with polynomial of degree 3

Wejście	Współczynniki funkcji regresji Zmn.: G_{oz} ; $R^2 = ,93$; Popr.:91 Resztowy MS=1482,00					
	Wsp.	Błąd std	t(20)	p	-95,% Gran.ufn	+95,% Gran.ufn
(x) dodatek AW [%]	1069,59	445,70	2,40	0,026	139,88	1999,29
(y) dodatek EP [%]	6492,70	1098,96	5,91	0,000	4200,31	8785,09
(z) olej bazowy [%]	15,51	1,83	8,46	0,000	11,69	19,34
xy	-465,13	162,17	-2,87	0,010	-803,41	-126,85
xz	-12,86	5,07	-2,54	0,020	-23,43	-2,28
yz	-71,39	11,94	-5,98	0,000	-96,30	-46,48
xyz	4,77	1,76	2,71	0,014	1,10	8,44

Analiza wartości oceniających istotność statystyczną współczynników modelu z niepełnym wielomianem stopnia 3 zamieszczonych w **Tabeli 10** w pełni potwierdziła istotności wszystkich współczynników tego modelu, co uzasadnia przyjęcie funkcji:

$$G_{oz} = 1069,59*x+6492,70*y+15,51*z-465,17*x*y-12,86*x*z-71,39*y*z+4,77*x*y*z$$

jako modelu bardzo dobrze odwzorowującego wpływ zawartości kompozycji dodatków AW i EP na własności przeciwzużyciowe badanego środka smarowego.

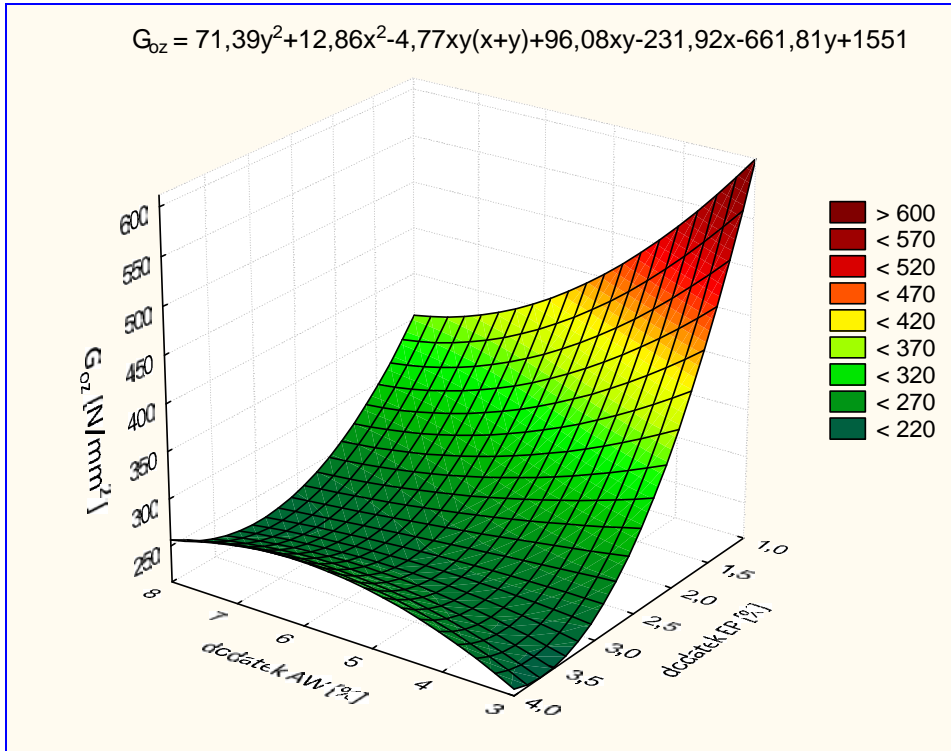
Podstawiając w modelu p_{oz} :

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

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

$$G_{oz} = 71,39y^2+12,86x^2-4,77xy(x+y)+96,08xy-231,92x-661,81y+155.1$$

Wykres przestrzenny modelu regresyjnego G_{oz} z niepełnym wielomianem stopnia 3 zawartości dodatków AW i EP pokazano na **Rysunku 2**.



Rys. 2. Wykres 3D funkcji regresji zależności G_{oz} od zawartości dodatków AW i EP
 Fig. 2. Chart 3D G_{oz} in dependence of AW and EP additives

Analiza wartości oceniających istotność statystyczną współczynników modelu wielomianowego stopnia 2 zamieszczonych w **Tabeli 11** w potwierdza istotność zawartych w niej współczynników tego modelu, co uzasadnia przyjęcie funkcji:

$$G_{oz} = -56,62x + 4121,34y + 10,92z - 25,56xy - 45,17yz$$

jako istotnego statystycznie i adekwatnego (**Tab. 9**) modelu odwzorowującego wpływ zawartości kompozycji dodatków AW i EP na własności przeciwdrożdżeniowe badanego środka smarowego.

Tabela 11. Wartości parametrów statystycznych oceniających istotność modelu G_{oz} z wielomianem stopnia 2

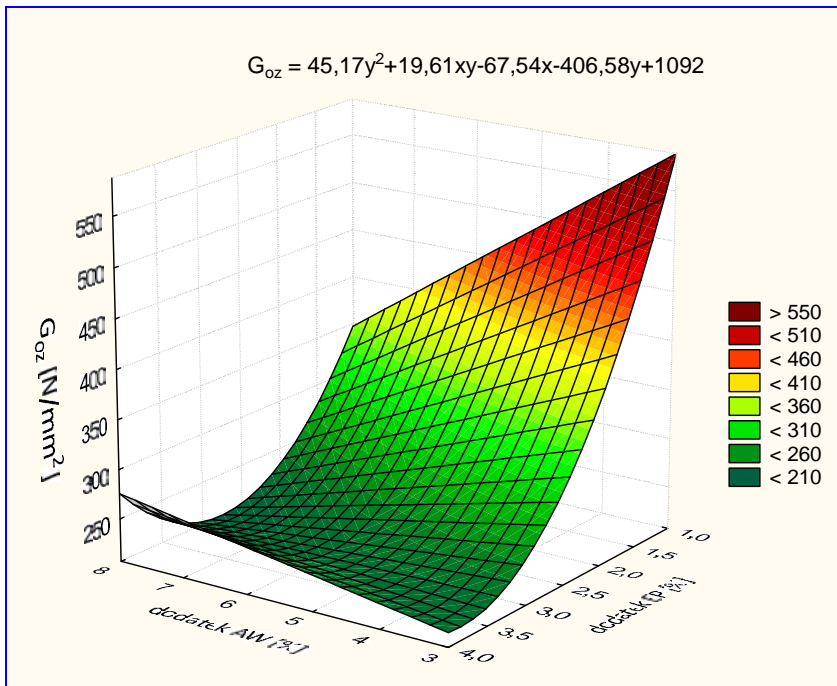
Table 11. The values of the statistical parameters that evaluate the significance of the model G_{oz} with polynomial of degree 2

Wejście	Wsp. (składniki rzecz.); Zmn.: G_{oz} ; $R^2=,90$; Popr.:89 3 Plan dla mieszaniny; suma mieszaniny = 100, 27 układów Resztowy MS=1850,65					
	Wsp.	Błąd std	t(22)	p	-95,% Gran.ufn	+95,% Gran.ufn
(x) dodatek AW [%]	-56,62	8,72	-6,49	0,00	-74,71	-38,53
(y) dodatek EP [%]	4121,34	742,14	5,55	0,00	2582,23	5660,44
(z) olej bazowy [%]	10,92	0,66	16,65	0,00	9,56	12,27
xy	-25,56	8,48	-3,01	0,01	-43,15	-7,98
yz	-45,17	7,81	-5,79	0,00	-61,36	-28,98

Po eliminacji zmiennej z powyższa funkcja regresji G_{oz} przyjmuje postać:

$$G_{oz} = 45,17y^2 + 19,61xy - 67,54x - 406,58y + 1092$$

Wykres 3D modelu regresyjnego zależności G_{oz} od zawartości dodatków AW i EP pokazano na **Rysunku 3**.



Rys. 3. Wykres 3D funkcji regresji zależności G_{oz} od zawartości dodatków AW i EP

Fig. 3. Chart 3D of quadratic function G_{oz} in dependence of AW and EP additives

PODSUMOWANIE

Zastosowanie metod planowania eksperymentów dla mieszanin umożliwiło identyfikację istotnych statystycznie zależności pomiędzy zawartością kompozycji dodatków AW i EP w estrowym 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 dodatków AW i EP w oleju opracowano modele regresyjne z wielomianami stopnia 2 i 3 charakteryzujące się bardzo dobrym dopasowaniem do badanych zbiorów danych – wyników testów tribologicznych, na podstawie których wyznaczono wartości p_{oz} i G_{oz} . Przedstawione modele okazały się modelami adekwatnymi do opisywanych danych, o czym świadczy nieistotny statystycznie udział braku dopasowania w błędzie całkowitym.

W przypadku wpływu zawartości kompozycji dodatków AW i EP na wartość granicznego nacisku zatarcia p_{oz} wyznaczono model wielomianowy stopnia 3 istotny statystycznie o bardzo wysokiej wartości współczynnika determinacji R^2 (na poziomie 98%). Ponieważ w tym modelu wszystkie wyznaczone współczynniki funkcji regresji okazały się istotnymi statystycznie, zaś model z wielomianem stopnia 2 okazał się modelem nieadekwatnym, zatem model z wielomianem stopnia 3 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 regresji zawartości kompozycji dodatków AW i EP otrzymano dwa modele istotne statystycznie: wielomian stopnia 3 o współczynniku determinacji $R^2 = 93\%$, i wielomian stopnia 2 o $R^2 = 90\%$. Ponieważ w obu modelach funkcji regresji wyznaczone współczynniki okazały się istotnymi statystycznie, oba modele funkcji regresji G_{oz} można wykorzystywać w prognozowaniu wartości granicznego obciążenia zużycia w zależności od zawartości kompozycji dodatków AW i EP, preferując wskazania modelu wyższego stopnia jako w większym stopniu dopasowanego do danych źródłowych.

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. Stachowiak G.W., Batchelor A.W.: Engineering tribology. Elsevier, London, New York, Tokyo, Amsterdam 1993.
2. Płaza S., Margielewski L., Celichowski G.: Wstęp do tribologii i tribochemii. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, 2005.

3. Burakowski T., Marczak R.: Eksploatacyjna warstwa wierzchnia i jej badanie. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn* 1995, 3 (103), 327–337.
4. Praca zbiorowa (red. Szczerek M., Wiśniewski M.): *Tribologia i tribotechnika*. Polskie Towarzystwo Tribologiczne, Instytut Technologii Eksploatacji, Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Mechaników Polskich, Radom 2000.
5. Andersson S., Söderberg A., Björklund S.: Friction models for sliding dry, boundary and mixed lubricated contacts. *Tribology Intern.*, 2007, 40, 580–587.
6. Junxiu Dong at all: A new concept – formation of permeating layers from nonactive antiwear additives. *Journal of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers* nr 1/1999.
7. Ruta R., Matuszewska A., Gradkowski M., Makowska M.: Modelowanie wpływu dodatków AW/EP na właściwości tribologiczne środków smarowych. *Tribologia*, 2013, 2, 169–182.
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 a statistical analysis of the research results concerning the influence of the commercial AW and EP additives on the tribological properties of a lubricant that was produced based on ester oil.

The research utilized in methods for planning experiments for mixtures with limitations to identify the impact of commercial AW and EP additives on the tribological properties of the lubricant that was produced on the basis of ester 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 the additives' content on the p_{oz} and G_{oz} parameters was estimated. Based on the obtained results, statistically significant regression models of these relationships were developed.