

**Ryszard RUTA\***, **Andrzej BATOR\***

## **MODELE PROGNOSTYCZNE WŁAŚCIWOŚCI TRIBOLOGICZNYCH ŚRODKÓW SMAROWYCH**

### **PROGNOSTIC MODELS OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF LUBRICANTS**

#### **Słowa kluczowe**

kompozycje smarowe, dodatki smarne, zacieranie, zużycie

#### **Key words:**

lubricant compositions, lubricant additives, scuffing, wear

#### **Streszczenie**

W artykule przedstawiono możliwość wykorzystania do celów prognostycznych modeli regresyjnych wpływu zawartości kompozycji komercyjnych pakietów dodatków AW i EP na właściwości tribologiczne środków smarowych. Właściwości tribologiczne badanych środków smarowych oceniano za pomocą wielkości:  $G_{oz}$  – granicznego obciążenia zużycia oraz  $p_{oz}$  – granicznego nacisku zatarcia wyznaczanych za pomocą aparatu czterokulowego T-02. Badano środki smarowe utworzone na bazie oleju: mineralnego, estrowego i węglowodorowego. Na podstawie wyników badań opracowano modele regresyjne i oceniono ich możliwości prognostyczne.

---

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

## 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].

Ponadto samo wprowadzenie do węzła tarcia środka smarowego powoduje zmniejszenie tarcia zewnętrznego lub jego zamianę na tarcie wewnętrzne [L. 6, 7]. Zmniejszenie tarcia oprócz zwiększenia niezawodności węzła tarcia skutkuje także zmniejszeniem zużycia energii pobieranej przez dane urządzenie.

Ponadto wprowadzenie środków smarowych w istotny sposób obniża procesy destrukcji elementów węzła tarcia [L. 8–11].

Współczesne środki smarowe to zrównoważone pod względem fizykochemicznym kompozycje oleju bazowego (podstawowego) i szeregu substancji chemicznych, które kształtują jego ostateczne właściwości funkcjonalne [L. 12–14]. Czyste oleje bazowe co prawda wykazują pewne właściwości smarne, lecz zazwyczaj są one zbyt niskie, by olej skutecznie spełniał założone funkcje w systemie tribologicznym. Stąd wprowadzenie do niego różnorodnych dodatków uszlachetniających poprawia określone właściwości oleju w warunkach tarcia. Ze względu na spełniane funkcje wyróżnia się kilka głównych klas dodatków, przy czym za jedno z ważniejszych uważa się dodatki przeciwzużyciowe AW i przeciwzatarciowe EP [L. 15–17]. W praktyce najczęściej wprowadza się do oleju dodatki w postaci pakietów zawierających składniki spełniające różnorodne funkcje. Składniki pakietów dobierane są w taki sposób, aby w miarę możliwości występował pomiędzy nimi efekt synergicznych oddziaływań pomiędzy poszczególnymi składnikami oleju.

Dążenie do uzyskania środków smarowych spełniających określone wymagania, przy braku teorii, która pozwala jednoznacznie wiązać właściwości elementarnych składników oleju z jego właściwościami makroskopowymi oraz brak modeli matematycznych opisujących wpływ zawartości dodatków na własności tribologiczne środków smarowych, komplikuje możliwość apriorycznego prognozowania ich właściwości eksploatacyjnych. Wielowariantowość możliwych zawartości dodatków czyni nieefektywnym dobieranie składników środka smarowego metodą kolejnych przybliżeń. Dlatego też konieczne staje się

wspomaganie projektowania składu środka smarowego metodami modelowania matematycznego w celu opracowania obliczeniowych modeli prognostycznych umożliwiających oszacowanie własności tribologicznych środka smarowego w zależności od zawartości dodatków.

## PRZEDMIOT I METODY BADAŃ

Przedmiotem badań były środki smarowe tworzone na bazie olejów: mineralnego, estrowego i węglowodorowego za pomocą zestawów komercyjnych dodatków AW i EP. Zastosowany w badaniach dodatek AW o działaniu przeciwzużyciowym, oparty na dialkilditiofosforanach, 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. 18] 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 zawartości zestawów dodatków w środku smarowym wyznaczono metodami planowania eksperymentów dla mieszanin z ograniczeniami i tak utworzoną kompozycję homogenizowano poprzez mechaniczne mieszanie.

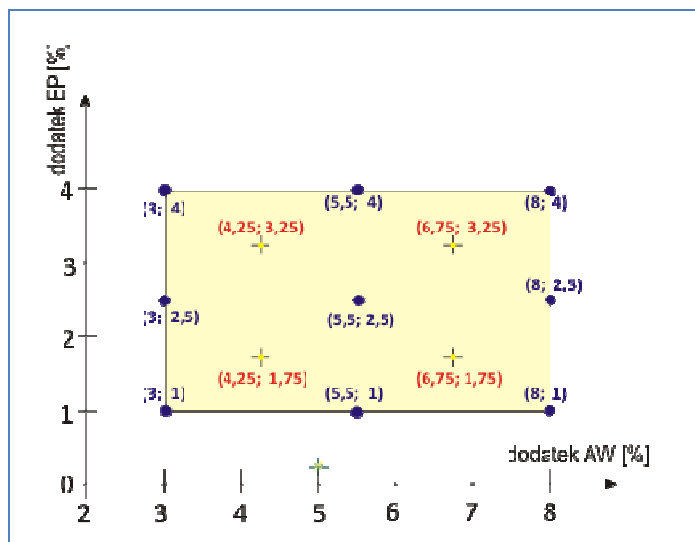
Właściwości smarne wytworzonych kompozycji olejowych zbadano za pomocą aparatu czterokulowego T-02.

Jako miarę własności tribologicznych 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. 19]. Jako parametr charakteryzujący przeciwzużyciowe właściwości kompozycji smarowych stosowano wskaźnik  $G_{oz}$ , wyznaczony zgodnie z metodyką opisaną w normie PN-76/C-04147.

## BADANIA EKSPERYMENTALNE

Na potrzeby identyfikacji wpływu zawartości składników na określone własności ich mieszaniny opracowano plan eksperymentów umożliwiający minimalizację liczby doświadczeń koniecznych do identyfikacji współczynników funkcji modelu matematycznego odwzorowującego badaną zależność [L. 20]. Przy czym niezbędna liczba eksperymentów identyfikacyjnych uzależniona jest od 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 wykorzystano plan eksperymentu sympleksowo-centroidowy, zawierający 9 układów eksperymentów. Zastosowany plan eksperymentów umożliwia wy-

znaczenie współczynników wielomianu trzeciego stopnia odwzorowującego wpływ zawartości składników na badane własności tribologiczne ( $p_{oz}$ ,  $G_{oz}$ ). Układy planu eksperymentów przedstawiono na **Rys. 1** w postaci punktów, których współrzędne reprezentują zestawy zawartości dodatków AW i EP mieszczą się w obrębie prostokąta wyznaczającego tzw. obszar eksperymentu identyfikacyjnego.



**Rys. 1. Obszar eksperymentu identyfikacyjnego**

Fig. 1. The domain of the regression function

Obszar eksperymentu identyfikacyjnego wyznacza dziedzinę funkcji regresji wpływu zawartości dodatków na własności tribologiczne środka smarowego. W celu zwiększenia wiarygodności statystycznej wyników identyfikacji oraz uzyskania zależności istotnych statystycznie (na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ ) zaplanowano dwukrotne powtórzenie wygenerowanego układu eksperymentów. Ponadto dla oceny możliwości prognostycznych opracowywanych modeli zaplanowano cztery układy eksperymentów weryfikacyjnych (zaznaczonych krzyżykami na **Rys. 1**). Układy te dobrano w taki sposób, aby były one w jak największej odległości od sąsiadujących z nimi układami identyfikacyjnymi.

Dla każdego oleju bazowego wykonano po 13 (9 + 4) próbek środków smarowych o zawartościach dodatków AW i EP zgodnych z opracowanymi planami układów eksperymentów identyfikacyjnych i weryfikacyjnych. Dla każdej próbki wyznaczono po trzy wartości granicznego nacisku zatarcia  $p_{oz}$  i granicznego obciążenia zużycia  $G_{oz}$ .

## MODELE MATEMATYCZNE

Wykorzystując analizę regresji wielokrotnej [L. 21], opracowano modele matematyczne odwzorowujące zależność pomiędzy  $p_{oz}$  i  $G_{oz}$  (wielkościami przyjętymi jako zmienna zależna Y) i zawartością procentową oleju bazowego i dodatków AW i EP w środku smarowym (wielkościami zmiennych niezależnych X).

Zgodnie z zasadami stosowania metody regresji opracowanie regresyjnych modeli matematycznych wymaga: wyznaczenia wartości współczynników funkcji odwzorowującej poszukiwaną zależność, zbadania ich istotności statystycznej oraz ocenę jakości odwzorowania opracowanego modelu.

Współczynniki funkcji regresji wyznacza się jako rozwiązanie zadania minimalizacji sumy kwadratów różnic wartości wyznaczonych za pomocą badanej funkcji z wynikami badań.

Natomiast do oceny istotności statystycznej i jakości odwzorowania wykorzystuje się analizę wariancji ANOVA.

Zastosowane w badaniach układy planów eksperymentów dla mieszanin umożliwiają dopasowanie wyników badań do funkcji wielomianowej stopnia trzeciego:

$$y = a_1x + a_2y + a_3z + b_{12}xy + b_{13}xz + b_{23}yz + c_{12}xy(x-y) + c_{13}xz(x-z) + c_{23}yz(y-z) + d_{123}xyz$$

gdzie:  $y - p_{oz}$  lub  $G_{oz}$ ,

$x$  – zawartość procentowa dodatku AW w środku smarowym,

$y$  – zawartość procentowa dodatku EP w środku smarowym,

$z = 100\% - (x + y)$  zawartość procentowa oleju bazowego w środku smarowym.

W rezultacie analizy regresji wyników opisujących własności tribologiczne badanych środków smarowych opracowano modele matematyczne zależności granicznego nacisku zatarcia  $p_{oz}$  i granicznego obciążenia zużycia  $G_{oz}$  od zawartości dodatków AW i EP w postaci wielomianów stopnia trzeciego. Wartości współczynników opracowanych modeli regresyjnych pokazano w **Tabeli 1**.

Analiza wariancji potwierdziła istotność statystyczną (na przyjętym poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ ) opracowanych modeli. Prawie wszystkie (z wyjątkiem jednego) współczynniki prezentowanych modeli są współczynnikami istotnie statystycznie większymi od zera. Tylko współczynnik przy zmiennej  $x$  (zawartości dodatku AW) w modelu granicznego obciążenia zużycia  $G_{oz}$  dla środka smarowego opracowanego na bazie oleju węglowodorowego okazał się współczynnikiem nieistotnym statystycznie i w związku z tym decyzję o jego włączeniu do modelu uzależniono od wyników weryfikacji zdolności prognostycznych modelu.

W ostatnim wierszu **Tabeli 1** zamieszczono wartości współczynnika determinacji wielowymiarowej  $R^2$ , oceniającego udział zmienności badanej zależności wyjaśniany poprzez oszacowane równanie regresji. Analiza opracowanych modeli (zwłaszcza granicznego nacisku zatarcia  $p_{oz}$ ) wykazała, że charakteryzują się one bardzo dobrym i dobrym dopasowaniem do wyników badań.

**Tabela 1. Wartości współczynników funkcji regresji  $p_{oz}$  i  $G_{oz}$**

Table 1. The values of the coefficients of the regression function  $p_{oz}$  and  $G_{oz}$

	współczynniki funkcji regresji $p_{oz}$			współczynniki funkcji regresji $G_{oz}$		
	mineralny	estrowy	węglowodorowy	mineralny	estrowy	węglowodorowy
dodatek AW x	191,12	283,02	130,32	-11,73	1070,68	-48,51
dodatek EP y	-43035,44	-67759,98	-50340,52	27627,22	6496,94	21868,33
olej z	-8,28	-25,64	-22,41	19,56	15,52	16,64
xy	2928,68	4545,96	2469,46	-1647,51	-465,59	-1531,09
xz					-12,87	
yz	457,50	718,60	537,43	-291,62	-71,44	-230,70
xyz	-27,44	-42,22	-21,38	14,70	4,77	14,10
xy(x-y)	-25,37	-44,40	-21,66	16,24		16,59
$R^2$	<b>0,99</b>	<b>0,98</b>	<b>0,99</b>	<b>0,99</b>	<b>0,93</b>	<b>0,96</b>

Ponieważ modele regresyjne zostały opracowane na podstawie wyników badań z powtórzeniami, oceniono: wartość tzw. czystego błędu oraz ogólnego braku dopasowania<sup>1)</sup>. Spośród badanych modeli negatywny rezultat testu na brak dopasowania modelu do wyników badań dotyczył wszystkich modeli granicznego nacisku zatarcia  $p_{oz}$  i tylko jednego modelu  $G_{oz}$  środka smarowego opracowanego na bazie oleju estrowego. W przypadku środków smarowych opracowanych na bazie olejów mineralnego i węglowodorowego pozytywny rezultat testu na brak dopasowania modeli granicznego obciążenia zużycia  $G_{oz}$  wskazywał brak możliwości dopasowania badanej zależności za pomocą funkcji trzeciego stopnia.

<sup>1)</sup> Czysty błąd ocenia zmienność wielkości wyjściowej dla identycznych wartości wejściowych, czyli 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.

Analiza współczynników modeli granicznego nacisku zatarcia  $p_{oz}$  wskazuje na podobny charakter modelowanej zależności dla badanych środków smarowych – współczynniki przy poszczególnych zmiennych mają taki sam znak i różnią się tylko wartością. Na uwagę zasługują dodatnie wartości współczynników przy zmiennych  $x_y$  i  $y_z$  wskazującą na synergiczne działanie dodatku przeciwzatarciowego EP z dodatkiem przeciwzużyciowym AW i olejem bazowym.

W przypadku modeli granicznego obciążenia zużycia  $G_{oz}$  dla środków smarowych opracowanych na bazie oleju mineralnego i węglowodorowego otrzymano podobne (ze względu na znaki współczynników) modele wielomianu trzeciego stopnia i różniący się od nich model niepełny trzeciego stopnia dla środka smarowego opracowanego na bazie oleju estrowego. W modelach  $G_{oz}$  ujemne wartości przy współczynnikach  $x_y$  i  $y_z$  (oraz  $x_z$ ) świadczą o asynergicznym oddziaływaniu dodatków AW i EP zarówno między sobą, jak i z estrowym olejem bazowym.

W celu oceny możliwości prognostycznych (interpolacyjnych) opracowanych modeli w punktach weryfikacyjnych wyznaczono względne błędy odwzorowania, oceniające różnice wartości obliczonych za pomocą badanego modelu z wartościami zmierzonymi na podstawie próbek oleju opracowanych według zawartości dodatków wyznaczonych dla tych punktów.

Wyniki oceny zdolności prognostycznych dla modeli granicznego nacisku zatarcia  $p_{oz}$  pokazano w **Tabeli 2**, a dla modeli granicznego obciążenia zużycia  $G_{oz}$  w **Tabeli 3**.

**Tabela 2. Wyniki oceny zdolności prognostycznych funkcji regresji  $p_{oz}$**

Table 2. The results of the evaluation of the ability of foresight of the regression function  $p_{oz}$

dodat. AW [%]	dodat. EP [%]	olej [%]	mineralny		estrowy		węglowodorowy	
			poz	Mpoz	poz	Mpoz	poz	Mpoz
4,25	1,75	94	2079,31	2110,97	1837,48	1890,71	1720,02	1776,95
			9,44%	1,52%	2,59%	2,90%	26,19%	3,31%
6,75	1,75	91,5	1870,26	1919,36	1388,66	1494,11	1326,15	1574,60
			9,73%	2,63%	9,04%	7,59%	16,56%	18,74%
4,25	3,25	92,5	2858,79	2763,70	2696,06	2875,74	2915,20	2936,09
			4,10%	-3,33%	4,17%	6,66%	3,57%	0,72%
6,75	3,25	90	2773,11	2624,18	2447,03	2533,46	2372,70	2757,59
			6,68%	-5,37%	7,44%	3,53%	7,94%	16,22%
średnie wartości błędów:			7,49%	3,21%	5,81%	5,17%	13,57%	9,75%

W **Tabeli 2** w pierwszych trzech kolumnach podano zawartości dodatków i oleju bazowego w środku smarowym w danym układzie weryfikacyjnym. W następnej kolumnie ( $p_{oz}$ ) podano średnią z trzech wartości zmierzonego granicznego nacisku zatarcia, a pod nią względny błąd jej pomiaru liczony jako stosunek max różnicy wyznaczonych wartości do ich średniej. Natomiast w kolumnie „ $Mp_{oz}$ ” podano wartość obliczoną na podstawie badanego modelu, a pod nią w procentach wartość błędu względnego odwzorowania pomiędzy wartością wyznaczoną w badaniach weryfikacyjnych a wartością prognozowaną danym modelem. W ostatnim wierszu podano wartości średnie: błędów pomiaru i błędu względnego odwzorowania. Podobną strukturę ma tabela 3 dotycząca modeli  $G_{oz}$ , w której dla środka smarowego na bazie oleju węglowodorowego pojawiła się dodatkowa kolumna  $M'G_{oz}$  zawierająca dane dotyczące modelu z pominiętym współczynnikiem przy zmiennej  $x$ .

Analizując rezultaty zawarte w tabeli, można stwierdzić, że modele granicznego nacisku zatarcia  $p_{oz}$  środka smarowego na bazie oleju mineralnego charakteryzuje się bardzo dobrymi możliwościami prognostycznymi. Średni względny błąd odwzorowania 3,3% jest mniejszy od średniego błędu względnego pomiarów 7,5%. Podobnie w przypadku środka smarowego na bazie oleju estrowego średni względny błąd odwzorowania nie przekracza 5,2% i jest porównywalny ze średnim błędem względnym pomiarów  $p_{oz}$  równym 5,8% próbki. Przy czym maksymalny błąd względny nie przekracza 7,6% przy błędzie względnym pomiaru badanej próbki 9%.

Znacznie gorsze rezultaty otrzymano w przypadku środka smarowego na bazie oleju węglowodorowego, gdzie średni względny błąd odwzorowania nie przekracza 9,8% i jest mniejszy od średniego błędu względnego pomiarów  $p_{oz}$  w próbkach równego 13,6%. Jak można zauważyć, próbki o zawartości 6,75% dodatku przeciwzużyciowego AW charakteryzują się zdecydowanie większym błędem prognozowania 16÷19% wobec błędu 1÷3% błędu próbek o zawartości 4,55% tego dodatku.

Natomiast na podstawie analizy rezultatów zawartych w **Tabeli 3** można stwierdzić, że modele granicznego obciążenia zużycia  $G_{oz}$  charakteryzują się zdecydowanie gorszymi możliwościami prognostycznymi w stosunku do modeli granicznego nacisku zatarcia  $p_{oz}$ . I tak dla środka smarowego na bazie oleju mineralnego średni względny błąd odwzorowania jest na poziomie 21% i jest porównywalny z 19,8% średnim błędem względnym pomiarów w próbkach weryfikacyjnych. Prawie 30% średni błąd prognozy wystąpił w przypadku środka smarowego opracowanego na bazie oleju estrowego. W przypadku środka smarowego na bazie oleju węglowodorowego, przy średnim błędzie względnym pomiarów 23,2%  $G_{oz}$  w próbce weryfikacyjnej, średni względny błąd odwzorowania nie przekracza 24,5% dla modelu z nieistotnym statystycznie



**Tabela 3. Wyniki oceny zdolności prognostycznych funkcji regresji  $G_{oz}$** Table 3. The results of the evaluation of the ability of foresight of the regression function  $G_{oz}$ 

dodat. AW [%]	dodat. EP [%]	olej [%]	mineralny		estrowy		węglowodorowy		
			G <sub>oz</sub>	MGo <sub>z</sub>	G <sub>oz</sub>	MGo <sub>z</sub>	G <sub>oz</sub>	MGo <sub>z</sub>	M'Go <sub>z</sub>
4,25	1,75	94	621,60	496,02	239,61	360,30	419,79	457,21	663,56
			17,81%	-20,20%	19,88%	50,37%	18,89%	8,91%	36,74%
6,75	1,75	91,5	867,67	754,98	228,94	288,63	736,12	659,18	987,01
			13,71%	-12,99%	10,89%	26,07%	21,25%	-10,45%	25,42%
4,25	3,25	92,5	245,53	134,77	191,60	233,35	280,37	149,25	355,77
			12,52%	-45,11%	3,85%	21,79%	30,45%	-46,77%	21,19%
6,75	3,25	90	288,93	305,68	197,69	235,29	424,30	289,90	618,11
			34,93%	5,80%	8,75%	19,02%	22,28%	-31,68%	31,35%
średnie wartości błędów:			19,74%	21,03%	10,84%	29,31%	23,22%	24,45%	28,68%

współczynnikiem przy zmiennej  $x$  i prawie 29% dla modelu bez tego współczynnika. O ograniczonych możliwościach prognostycznych modeli  $G_{oz}$  świadczą również wartości maksymalne błędów na poziomie 37÷50% dla badanych środków smarowych.

## PODSUMOWANIE

Zastosowanie metod planowania eksperymentów dla mieszanin umożliwiło identyfikację istotnych statystycznie zależności pomiędzy zawartością kompozycji dodatków AW i EP w badanych środkach smarowych a własnościami smarnymi wytworzonego środka, ocenianymi na podstawie wartości granicznego nacisku zatarcia  $p_{oz}$  oraz granicznego obciążenia zużycia  $G_{oz}$ . Dla zidentyfikowanych eksperymentalnie zależności opracowano 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 granicznego nacisku zatarcia  $p_{oz}$  opracowano modele wielomianowe stopnia 3, istotne statystycznie o bardzo wysokiej (na poziomie 98÷99%) wartości współczynnika determinacji  $R^2$ . Opracowane modele charakteryzują się bardzo dobrymi możliwościami prognostycznymi zwłaszcza dla środków smarowych opracowanych na bazie olejów mineralnego i estrowego.

Dla modeli granicznego obciążenia zużycia  $G_{oz}$  również otrzymano istotne statystycznie modele funkcji regresji w postaci wielomianów 3 stopnia o nieco

mniejszych i bardziej zróżnicowanych wartościach współczynnika determinacji  $R^2$  na poziomie 93÷99%. Jednakże opracowane modele granicznego obciążenia zużycia  $G_{oz}$  charakteryzują się dużymi wartościami względnych błędów odwzorowania, co w znacznym stopniu ograniczają ich możliwości prognostyczne.

## 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. Magalhaes L., Martins R., Locateli C., Seabra J., Influence of tooth profile and oil formulation on gear power loss, *Tribology International* 43 (2010) 1861–1871.
7. Martins R., Seabra J., Magalhaes L., Austempered ductile iron (ADI) gears: power loss, pitting and micropitting, *Wear* 264 (2008) 838–849.
8. Kałdoński T.: *Tribologia i płyny eksploatacyjne. Cz. I Wybrane problemy tribologii*. WAT, Warszawa 1995.
9. Muller M., Mikilozic K.T., Daardin A., Spikes H.A., The design of boundary film-forming PMA viscosity modifiers, *Tribology Transactions* 49 (2) (2006) 225–232.
10. Krzan B., Vizintin Z., Tribological properties of an environmentally adopted universal tractor transmission oil based on vegetable oil, *Tribology International* 36 (2003) 827–833.
11. Mia S., Mizukami S., Fukuda R., Morita S., Ohno N., Highpressure behaviour and tribological properties of wind turbine gear oil, *Journal of Mechanical Science and Technology* 24 (2010) 111–114.
12. Mang T.: Future importance of base oils in lubricants. Proc. of 12th Int. Coll. “Tribology 2000 – Plus”, Esslingen (Germany), 2000, 23–35.
13. Zwierzycki W: *Oleje i smary przemysłowe. Rafineria Nafty GLIMAR – Instytut Technologii Eksploatacji, Gorlice – Radom* 2001.
14. Galvin P.A. et al.: Benefits for synthetic lubricants in industrial applications. Proc. of 13<sup>th</sup> Int. Coll. Tribology, Esslingen (Germany), 2002, 1091–1098.
15. Bhushan, B., *Modern Tribology Handbook, Vol. 1 – Principles of Tribology; Vol. 2 - Materials, Coatings, and Industrial Applications*, CRC Press Inc., Boca Raton, Florida, 2001.
16. Stachowiak G.W., Batchelor A.W.: *Engineering Tribology*, Elsevier, London, New York, Tokyo, Amsterdam 1993.
17. Williams J. *Engineering Tribology*. Cambridge University Press, 2005.
18. Ruta R., Matuszewska A., Gradkowski M., Makowska M.: Modelowanie wpływu dodatków AW/EP na właściwości tribologiczne środków smarowych. *Tribologia*, 2013, 2, 169–182.

19. Szczerek M., Tuszyński W.: Badania tribologiczne. Zacieranie. ITeE, Radom, 2000.
20. Dobosz M.: Wspomagana komputerowo statystyczna analiza wyników badań. AOW Exit, Warszawa 2001.
21. 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 ability to prediction of the regression models of the AE and EP additives effect on tribological properties of lubricants. The tribological properties of the elaborated lubricants were evaluated with the use of four-ball apparatus. The tribological parameters:  $G_{oz}$  – the limiting load of wear and  $p_{oz}$  – the limiting pressure of seizure were analyzed. The lubricants elaborated with the use of different oil basis namely: mineral, ester and hydrocarbon were investigated. Based on the research results the regression models were developed and theirs prediction abilities were evaluated.**

