

**Magdalena TRZOS\*, Ryszard RUTA\***

## **ANALIZA WPLYWU PLANU EKSPERYMENTU NA JAKOŚĆ MODELU WŁAŚCIWOŚCI PRZECIWZUŻYCIOWYCH**

### **THE IMPACT ANALYSIS OF THE EXPERIMENTAL PLAN ON THE MODEL OF ANTI-WEAR PROPERTIES**

#### **Słowa kluczowe:**

kompozycje smarowe, dodatki smarne, zużycie, modelowanie SSN

#### **Key words:**

lubricant compositions, lubricating additives, wear, modeling, SSN

#### **Streszczenie:**

W artykule przedstawiono wyniki analiz odwzorowania granicznego obciążenia zużycia opracowanego na podstawie danych eksperymentalnych. Badaniom poddano elementy współpracujące tarciovo w styku smarowanym olejem mineralnym modyfikowanym dodatkami przeciwzatarciowymi i przeciwzużyciowymi. Przeprowadzono dwie tury badań na podstawie różnych planów eksperymentu: planu dla mieszanin z ograniczeniami oraz centralnego planu kompo-

---

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

zycyjnego. Uzyskane wyniki eksperymentów zostały wykorzystane do budowy modeli opisujących wpływ zawartości dodatków w badanym środku smarowym na jego własności przeciwzużyciowe oceniane za pomocą granicznego obciążenia zużycia. Na podstawie wyników weryfikacji opracowanych modeli przeanalizowano przydatność przyjętych planów eksperymentu do opisu analizowanego wskaźnika tribologicznego oraz porównano jakość odwzorowań opracowanych z wykorzystaniem danych uzyskanych na podstawie różnych planów eksperymentu. Porównano również jakość modeli regresyjnych oraz jakość modeli opracowanych z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych.

## WPROWADZENIE

Rozwój techniki powoduje wzrost zainteresowania rozwiązaniami umożliwiającymi pracę narzędzi i urządzeń w warunkach coraz intensywniejszych wymuszeń, co z kolei jest przyczyną, między innymi, poszukiwania nowych środków zapewniających odpowiednie smarowanie węzłów tarcia.

Współczesne środki smarowe stanowią zazwyczaj kompozycję oleju bazowego i wielu substancji chemicznych, które kształtują jej właściwości funkcjonalne [L. 1, 2]. Wprowadzenie do oleju dodatków uszlachetniających ma na celu zapewnienie odpowiednich właściwości w zdefiniowanych warunkach tarcia. W praktyce najczęściej wprowadza się do oleju dodatki w postaci pakietów zawierających składniki spełniające różnorodne funkcje.

Ze względu na spełniane funkcje wyróżnia się kilka głównych klas dodatków, przy czym za jedne z ważniejszych uważa się dodatki przeciwzużyciowe AW i przeciwwzatarciowe EP.

Zdecydowana większość prac dotyczących wpływu dodatków na właściwości środków smarowych skoncentrowana jest na badaniach identyfikujących mechanizmy działania stosowanych dodatków [L. 3]. Prowadzone są również liczne badania wpływu zawartości określonych dodatków na właściwości tribologiczne środków smarowych [L. 4–6].

Jednak wielowariantowość możliwych zawartości dodatków czyni zazwyczaj stosowane dobieranie składników środka smarowego metodą kolejnych przybliżeń działaniem wielce nieefektywnym. Dlatego też na etapie projektowania środków smarowych niezbędne staje się zastosowanie prognozowania właściwości tribologicznych metodami modelowania matematycznego wspomaganego metodami statystycznego planowania eksperymentu.

Obecnie w naukach technicznych wykorzystujących badania eksperymentalne zasadniczym narzędziem do planowania badań, analizy wyników i budowy modeli matematycznych są metody statystyki matematycznej. W tribologii wykorzystywane są głównie podstawowe metody statystyki, takie jak analiza regresji z oceną modelu z użyciem analizy wariancji ANOVA [L. 7, 8]. Budowane są także modele z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych (SSN),

które w przypadku złożonych obiektów i procesów technicznych charakteryzujących się skomplikowanymi, przeważnie nieliniowymi zależnościami przyczynowo-skutkowymi, pozwalają na modelowanie zachowania obiektów bez konieczności identyfikowania skomplikowanych zależności funkcyjnych pomiędzy badanymi wielkościami. Sztuczne sieci neuronowe z sukcesem są stosowane do opracowywania modeli obliczeniowych w obszarze tarcia, zużycia i smarowania [L. 9–12].

Badania eksperymentalne właściwości środków smarowych prowadzone są, w zależności od celu badań, w różnych warunkach. Przyjmowane są różne zakresy zmiany parametrów oraz różne parametry są uwzględniane jako wielkości wpływające na zmianę właściwości smarnych. Ważnym zagadnieniem w badaniach eksperymentalnych jest wybór punktów pomiarowych w analizowanym obszarze badawczym i coraz częściej stosowane są w tym celu metody planowania eksperymentów [L. 13, 14]. Ponadto rosnącym zainteresowaniem cieszą się metody zapewnienia optymalnych warunków pracy węzłów tribologicznych [L. 15–17].

Przedstawione uwarunkowania projektowania środków smarowych wskazują na konieczność włączenia metod eksperymentalnych do badania zarówno składników smaru, jak również wpływu potencjalnych wymuszeń generowanych przez warunki eksploatacyjne na właściwości smarne i ich stabilność. Wnioskowanie na podstawie uzyskanych wyników wymaga z kolei opracowania metody zarówno przygotowania eksperymentu, jak również opracowania modeli prognostycznych wspomagających procesy projektowania środków smarowych. W artykule przedstawiono problem modelowania zawartości dodatków przeciwzużyciowych i przeciwzatarciowych w kompozycji smarowej w kontekście zależności opracowanego modelu od przyjętego planu eksperymentu.

## METODA BADAŃ

Przedmiotem badań były środki smarowe tworzone na bazie oleju mineralnego z dodatkami – przeciwzatarciowym EP oraz przeciwzużyciowym AW. Zastosowany w badaniach komercyjny dodatek EP zawiera przede wszystkim siarkę stanowiącą 39,7% jego masy, ponadto także śladowe ilości fosforu – 0,75%. Natomiast dodatek o działaniu przeciwzużyciowym to komercyjny produkt, który zawiera w swym składzie 14,5% masowych siarki i 6,8% fosforu. Olej mineralny stanowiący olej bazowy charakteryzowały następujące własności: wskaźnik lepkości 107 (lepkość kinematyczna w temp. 40°C, – 78,7 mm<sup>2</sup>/s i w 100°C – 9,97 mm<sup>2</sup>/s) oraz średnia wartość granicznego obciążenia zużycia  $G_{oz} = 767 \text{ N/mm}^2$ . Na podstawie wcześniejszych badań [L. 18], dotyczących wpływu zawartości poszczególnych pakietów dodatków na własności tribologiczne środka smarowego oraz sugestii producenta, zawartość dodatków ograniczono do przedziału 1÷4% dodatku EP i 3÷8% wagowych dodatku AW.

Konkretne zawartości zestawów dodatków w środku smarowym wyznaczono metodami planowania eksperymentów dla mieszanin z ograniczeniami oraz metodą planowania eksperymentów kompozycyjnych. Wytworzone w ten sposób kompozycje homogenizowano poprzez mieszanie mechaniczne.

Właściwości przeciwzużyciowe wytworzonych kompozycji, oceniane na podstawie wartości  $G_{oz}$  – granicznego obciążenia zużycia, badano za pomocą aparatu czterokulowego, zgodnie z normą PN-76/C-04147. Parametry testu tribologicznego przedstawiono w **Tab. 1**.

**Tabela 1. Parametry procesu wyznaczania granicznego obciążenia zużycia**

Table 1. The parameters of the process determining the wear limiting load capacity

Czas [s]	Prędkość obrotowa [obr/min]	Obciążenie [N]	Temperatura [°C]
3600	500	392	20

Przed testami tribologicznymi wszystkie elementy testowe oczyszczano w benzynie ekstrakcyjnej za pomocą myjki ultradźwiękowej przez 10 minut.

Wartość  $G_{oz}$  wyznaczano na podstawie wielkości przyjętego obciążenia (392N) oraz wartości średniej średnicy śladów tarcia ( $d$ ) według zależności:

$$G_{oz} = 0,52 \frac{392}{d^2} [\text{N}/\text{mm}^2].$$

Przy czym wartość  $d$  wyznaczana była na podstawie średnic śladów tarcia na trzech nieruchomych kulkach aparatu T-02.

## PLANY EKSPERYMENTÓW

Dla porównania wpływu planu eksperymentu na opis właściwości smaru zaproponowano dwa różne plany, według których prowadzono badania eksperymentalne: plan dla mieszanin z ograniczeniami oraz plan centralny kompozycyjny [L. 13].

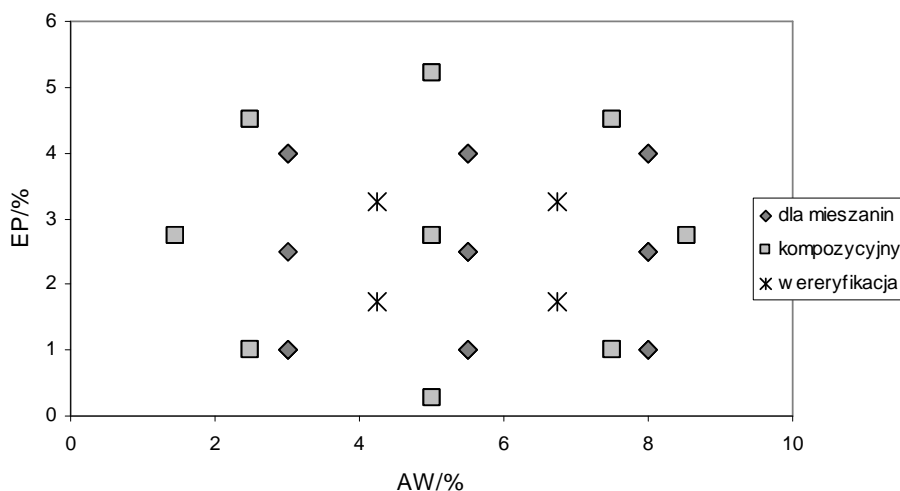
Wytworzone środki smarowe stanowią mieszaninę oleju bazowego oraz zastosowanych dodatków, dlatego też do zbadania właściwości przeciwzużyciowych zaplanowano przeprowadzenie badań na podstawie planu eksperymentu dla mieszanin. Przyjęto plan z ograniczeniami ze względu na ograniczone udziały procentowe dodatków w smarze.

Natomiast metodę planowania eksperymentów kompozycyjnych zastosowano jako standardową metodę optymalizacji umożliwiającą eksperymentalne poszukiwanie zawartości dodatków zapewniających uzyskanie największej wartości granicznego obciążenia zużycia.

Na podstawie teorii planowania eksperymentów eksperyment prowadzony jest zgodnie z wierszami macierzy, w kolumnach której współrzędne oznaczają procentową zawartość poszczególnych składników. Składniki te po wymieszaniu w określonych warunkach tworzą środek smarowy. Zbiór wszystkich wierszy macierzy tworzy plan eksperymentu. Rezultaty eksperymentu są podstawą do opracowania modelu matematycznego zależności  $G_{oz}$  od zawartości składników środka smarowego.

Wykorzystując metodę planowania eksperymentów centralnych kompozycyjnych wygenerowano plan eksperymentów zawierający 9 układów (**Rys. 1**), przy czym jeden z nich nazwany centrum planu wykonywany jest dwukrotnie [**L. 14**]. Natomiast za pomocą metody powierzchni odpowiedzi dla badanych środków smarowych wyznaczono również 9 układów planu eksperymentu identyfikacyjnego sympleksowo-centroidowego zawierającego 4 wierzchołki, 4 jednowymiarowe środki ciężkości i jeden dwuwymiarowy środek ciężkości, które umożliwiają wyznaczenie współczynników modelu trzeciego stopnia odwzorowującego wpływ zawartości składników na wartości  $G_{oz}$ .

Na **Rysunku 1** pokazano wzajemne usytuowanie punktów identyfikacyjnych opracowanych według planów centralnych kompozycyjnych i punktów układów eksperymentów opracowanych według planu dla mieszanin z ograniczeniami. Na rysunku przedstawiono również 4 punkty, na podstawie których weryfikowano opracowane modele.



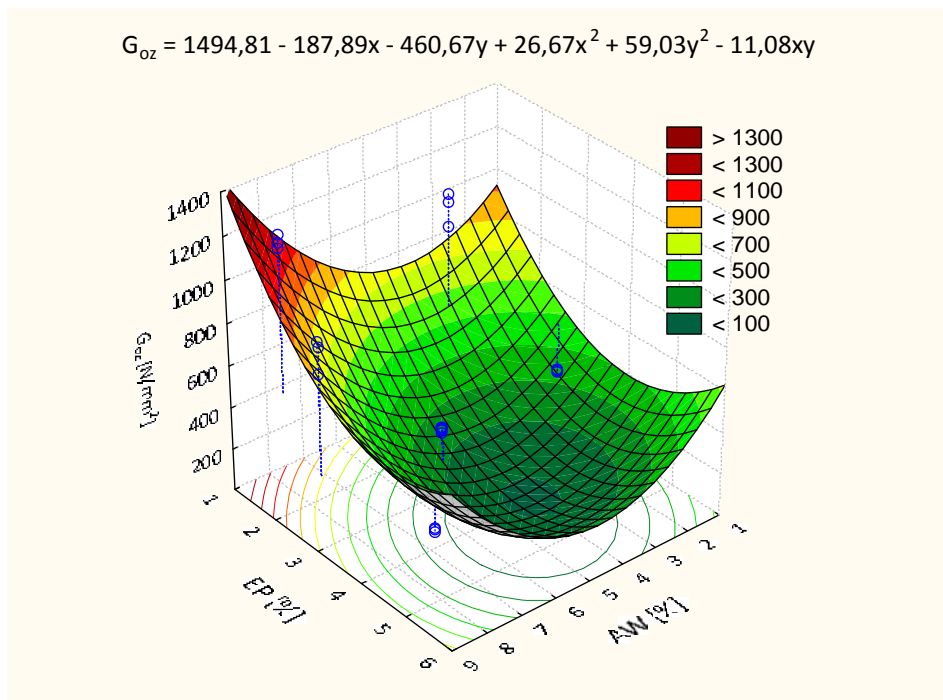
**Rys. 1. Punkty przestrzeni pomiarowej eksperymentów według różnych planów oraz punkty weryfikacyjne**

Fig. 1. The measuring points of the experiments according to different plans of experiments, and the verification points

## MODELE REGRESYJNE

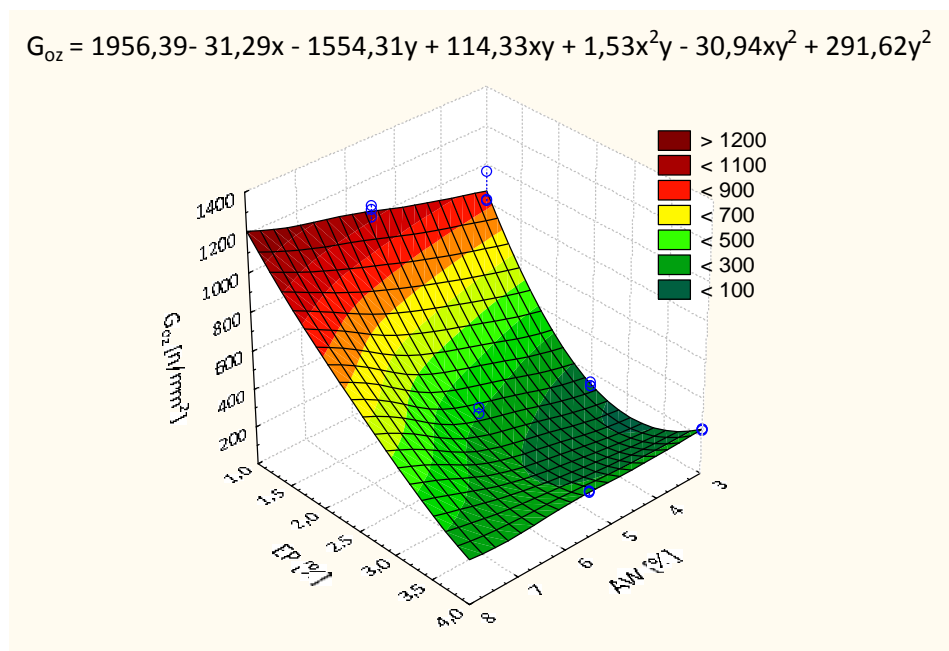
W rezultacie zastosowania analizy regresji do wyników badań przeprowadzonych dla środków smarowych skomponowanych według planu centralnego kompozycyjnego wyznaczono kwadratowy model regresyjny, natomiast dla skomponowanych według planu eksperymentu dla mieszanin z ograniczeniami otrzymano model regresyjny trzeciego stopnia.

Wpływ zawartości dodatków AW (zmienna x) i EP (zmienna y) na wartość granicznego obciążenia zużycia opisany opracowanymi modelami przedstawiono odpowiednio na **Rys. 2** i **3**. Każdy z opracowanych modeli regresyjnych okazał się istotny statystycznie o wszystkich współczynnikach istotnych statystycznie.



**Rys. 2.** Wykres funkcji regresji zależności  $G_{oz}$  od zawartości dodatków AW i EP opracowanej na podstawie planu kompozycyjnego

Fig. 2. The regression graph of the relationship  $G_{oz}$  and additives: AW and EP developed basis the compositional plan



**Rys. 3. Wykres przestrzenny regresji zależności  $G_{oz}$  od % zawartości dodatków AW i EP opracowanej na podstawie planu dla mieszanin**

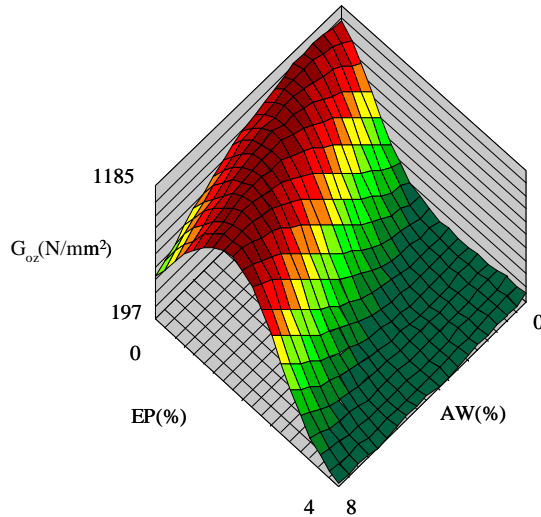
Fig. 3. The regression graph of the relationship  $G_{oz}$  and additives: AW and EP developed basis the mixtures plan

Oba opracowane modele bardzo dobrze odwzorowywały wyniki badań, na podstawie których zostały opracowane. I tak model kwadratowy w 93% odwzorowuje zmienność danych, a model trzeciego stopnia aż w 99%. Jednak modele w różny sposób odwzorowują badaną właściwość, co zobrazowano na **Rysunkach 2 i 3** powierzchni odpowiedzi modeli. Ocenę prognostycznych możliwości modeli przeprowadzono na podstawie badań weryfikacyjnych. Ich wyniki zostały przedstawione w dalszej części artykułu.

## MODELE TYPU SZTUCZNE SIECI NEURONOWE

W kolejnym etapie badań porównano modele neuronowe opracowane na podstawie danych opisujących graniczne obciążenie zużycia uzyskanych z analizowanych dwóch różnych planów eksperymentów.

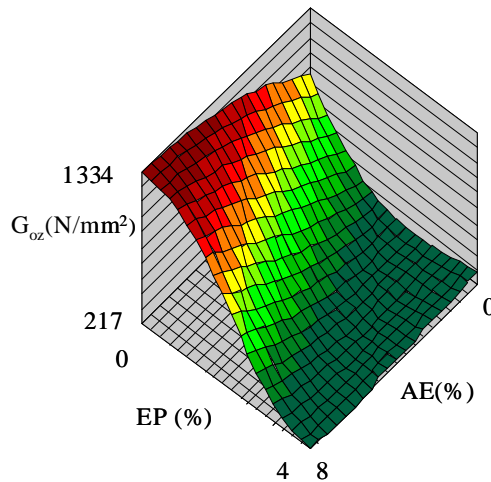
Na podstawie danych z eksperymentu kompozycyjnego opracowano model typu perceptron wielowarstwowy MLP\_KOM(2;4;1). Odwzorowanie wartości  $G_{oz}(EP;AW)$  na podstawie tego modelu przedstawiono na **Rys. 4**.



**Rys. 4. Odzworowanie wartości granicznego obciążenia zużycia na podstawie modelu MLP\_KOM(2;4;1)**

Fig. 4. The wear limiting load capacity calculations by the neural network model MLP\_KOM(2;4;1)

Kolejny model neuronowy MLP\_MSZ (2;6;1) opisujący graniczne obciążenie zużycia został opracowany na podstawie danych z eksperymentu wg planu dla mieszanin. Odzworowanie  $G_{oz}$  w zależności od zawartości dodatków na podstawie tego modelu przedstawiono na **Rys. 5**.



**Rys. 5. Odzworowanie wartości granicznego obciążenia zużycia na podstawie modelu MLP\_MSZ(2;6;1)**

Fig. 5. The wear limiting load capacity calculations by the neural network model MLP\_MSZ(2;6;1)



W powierzchniach odpowiedzi przedstawionych na **Rys. 4 i 5** widać pewne różnice w odwzorowaniu granicznego obciążenia zużycia w zależności od przyjętego planu eksperymentu (wyboru punktów pomiarowych).

Oba opracowane modele charakteryzują się dobrą jakością ocenianą na podstawie statystyk regresyjnych (**Tab. 2**), zarówno ze względu na wartość ilorazu odchyłeń standardowych (im mniejsza wartość, tym lepiej. Przyjmuje się, że wartości ilorazu 0,3 i mniejsze reprezentują dobre właściwości regresyjne modelu, a wartości powyżej 0,7 praktycznie dyskwalifikują przydatność modelu), jak również na korelacje między wynikami doświadczeń i obliczonymi przez model.

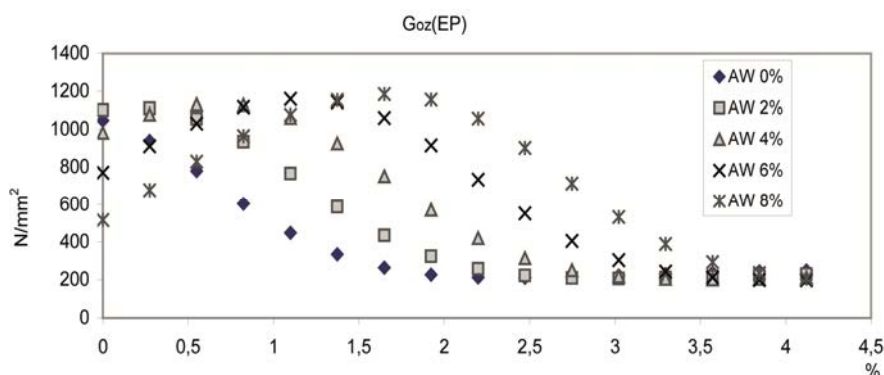
**Tabela 2. Statystyki regresyjne opracowanych modeli z uwzględnieniem danych uczących, weryfikacyjnych i testowych**

Table 2. The regression statistics of developed models with the learning, verification and test data consideration

	MLP_KOM(2;4;1)			MLP_MSZ(2;6;1)		
	Uczące	Weryfikacyjne	Testowe	Uczące	Weryfikacyjne	Testowe
Iloraz odch.	0,12	0,17	0,19	0,11	0,07	0,23
Korelacja	0,99	0,99	0,98	0,99	1	0,98

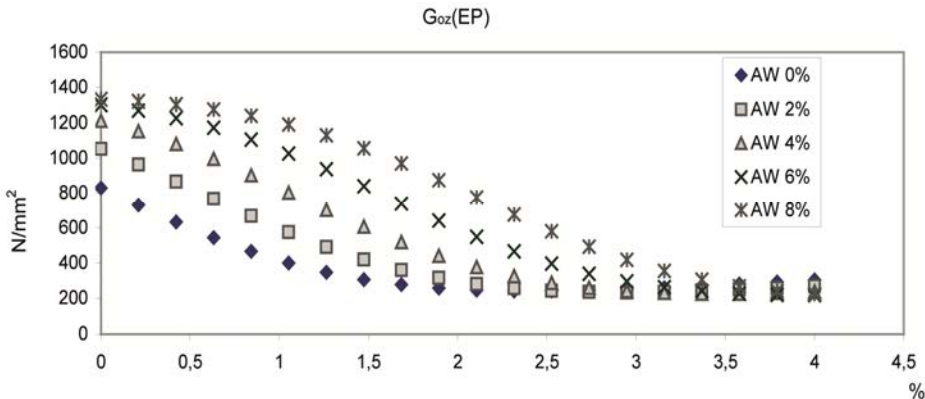
Dobre odwzorowanie danych zawartych w zbiorze testowym (dane te nie brały udziału w procesie uczenia modelu) świadczy o zdolności modeli do uogólniania wyników.

Na kolejnych **Rysunkach 6 i 7** przedstawiono, na podstawie wyliczeń z wykorzystaniem opracowanych modeli neuronowych, zależności wartości  $G_{oz}$  od zawartości procentowej dodatku przeciwzatarciowego EP przy różnych wartościach dodatku przeciwzużyciowego AW.



**Rys. 6. Odwzorowanie wartości granicznego obciążenia zużycia w zależności od zawartości dodatku EP na podstawie modelu MLP\_KOM(2;4;1), przy różnych wartościach dodatku AW**

Rys. 6. The calculations of the wear limiting load capacity, by the neural network model MLP\_KOM(2;4;1) in dependence of EP additive content for different content of AW additive



**Rys. 7.** Odzworowanie wartości granicznego obciążenia zużycia w zależności od zawartości dodatku EP na podstawie modelu MLP\_MSZ(2;6;1), przy różnych wartościach dodatku AW

Fig. 7. The calculations of the wear limiting load capacity, by the neural network model MLP\_MSZ(2;6;1), in dependence of EP additive content for different content of AW additive

Z przedstawionych na **Rys. 5–8** zależności wywnioskowano, że model opisujący wartość granicznego obciążenia zużycia w wykorzystaniu danych z planu centralnego kompozycyjnego, w zakresie do ok. 1% zawartości EP dla zawartości dodatku AW powyżej 2%, odzworowuje charakterystykę zużycia niezgodnie z charakterystykami opracowanymi na podstawie modelu bazującego na planie eksperymentu dla mieszanin. W tych przypadkach wraz ze zwiększeniem zawartości dodatku EP model MLP\_KOM(2;4;1) wykazuje większe wartości  $G_{oz}$ . Po przekroczeniu 1% zawartości EP następuje odwrócenie tej tendencji.

W przypadku zależności odzworowanych na podstawie planu eksperymentu dla mieszanin obserwowana jest poprawa właściwości przeciwzużyciowych wraz ze wzrostem procentowej zawartości dodatku AW i zmniejszeniem zawartości dodatku EP w całym analizowanym obszarze pomiarowym.

## WERYFIKACJA OPRACOWANYCH MODELI

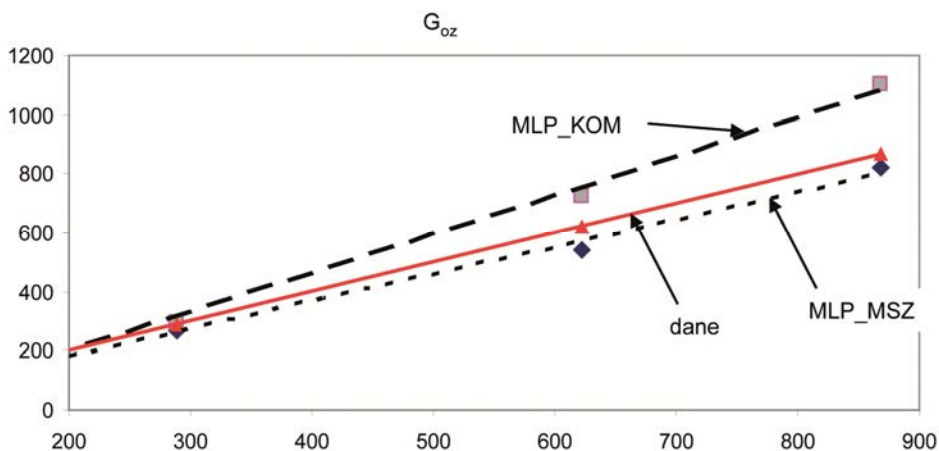
W celu sprawdzenia zdolności prognostycznych opracowanych modeli przeprowadzono badania weryfikacyjne w punktach (**Rys. 1**, punkty oznaczone gwiazdką) niuwzględnionych w zrealizowanych planach eksperymentu.

W przypadku modeli regresyjnych średni błąd względny (różnica wycień modelu i danych eksperymentalnych odniesiona do wartości wyznaczonej z badań eksperymentalnych) dla modelu opracowanego na podstawie wyników z planu centralnego kompozycyjnego wyniósł prawie 44%. Natomiast w przy-

padku modelu opracowanego na podstawie planu eksperymentu dla mieszanin wyniósł on ok. 21%.

Znacznie lepiej sytuacja przedstawiała się dla modeli opracowanych z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych. W przypadku modelu MLP\_KOM(2;4;1) średni błąd względny prognozy wniósł ok. 15%, a modelu MLP\_MSZ(2;6;1) ok. 7%.

Wyniki weryfikacji modeli MLP\_KOM(2;4;1) MLP\_MSZ(2;6;1) przedstawiono na **Rys. 8**.



**Rys. 8. Porównanie wyliczeń modeli neuronowych z danymi eksperymentalnymi**

Rys. 8. The comparison of calculations of the neural networks models with data of the verification experiment

W przypadku modelu MLP\_KOM wraz ze wzrostem wartości  $G_{oz}$  błąd odwzorowania znacząco rośnie, tendencja ta nie występuje w przypadku modelu MLP\_MSZ. Oznacza to, że model opracowany na podstawie planu eksperymentu dla mieszanin znacznie lepiej prognozuje możliwość uzyskania środka smarowego charakteryzującego się wysoką odpornością na zużycie poprzez odpowiedni dobór procentowej zawartości dodatków EP i AW.

## PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono ocenę możliwości prognostycznych modeli odwzorujących wpływ procentowej zawartości dodatków przeciwzużyciowego AW i przeciwzatarciowego EP na własności przeciwzużyciowe środka smarowego. Własności przeciwzużyciowe oceniano za pomocą granicznego obciążenia zużycia  $G_{oz}$  wyznaczonego empirycznie na aparacie czterokulowym.

W badaniach eksperymentalnych wykorzystano plan centralny kompozycyjny i plan dla mieszanin z ograniczeniami. Opracowane modele regresyjne w wysokim stopniu odwzorowywały wyniki badań eksperymentalnych. Natomiast możliwości prognostyczne opracowanych modeli okazały się ograniczone, a przy dużej zawartości dodatku EP i jednocześnie małej zawartości dodatku AW zupełnie nieprzydatne. Opracowane modele w postaci sztucznych sieci neuronowych również odwzorowywały rezultaty badań z dużą dokładnością, a ponadto posiadają znacznie większe możliwości prognostyczne, o czym świadczą niższe średnie błędy względne odwzorowania danych weryfikacyjnych. Przyczyn tego stanu rzeczy można się doszukiwać w wysoce nieliniowym wpływie zawartości dodatków na własności przeciwzużyciowe badanych środków smarowych. Potwierdza to wzrost możliwości prognostycznych wraz ze wzrostem nieliniowości modelu – model stopnia trzeciego obarczony był mniejszym błędem względnym w stosunku do modelu kwadratowego. Błąd ten z kolei osiągał wartości znacznie mniejsze w przypadku modeli SNN z definicji lepiej odwzorowujących zależności nieliniowe. Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono istotną przewagę możliwości prognostycznych modeli opracowanych na podstawie planu eksperymentu dla mieszanin z ograniczeniami w stosunku do modeli opracowanych na podstawie planu centralnego kompozycyjnego, zarówno w przypadku modeli regresyjnych, jak i opracowanych z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych.

Ponadto analiza rezultatów badań własności przeciwzużyciowych środków smarowych pozwoliła zaobserwować niekorzystny wpływ zawartości dodatku przeciwzatarciowego EP na przeciwzużyciowe działanie dodatku AW.

## LITERATURA

1. Mang T.: Future importance of base oils in lubricants. Proc. of 12th Int. Coll. "Tribology 2000 – Plus", Esslingen (Germany), 2000, 23–35.
2. Zwierzycki W.: Oleje i smary przemysłowe. Rafineria Nafty GLIMAR – Instytut Technologii Eksploatacji, Gorlice – Radom 2001.
3. Tuszyński W., Piekoszewski W.: Effect of the type and concentration of lubricating additives on the antiwear and extreme pressure properties and rolling fatigue life of a four-ball tribosystem. Lubrication Science. 2006, t. 18, nr 4, s. 309–328.
4. Michalczewski R. i inni: The effect of the concentration of AW/EP additives on scuffing resistance of the a-C:H:W/steel tribosystem. Materiały IV. Światowego Kongresu Tribologicznego w Kyoto (Japonia). 2009, s. 913.
5. Brecher A., Witt S., Yagmur T.: Influences of oil additives on the wear behavior of ball screws Prod. Eng. Res. Devel. 2009 nr 3, pp. 323–327.

6. Siwiec E., Grądkowski M., Molenda J.: Właściwości tribologiczne kompozycji smarowych zawierających wybrane dodatki ekologiczne. *Tribologia*. 2007, nr 6, s. 177–188.
7. Mandal N., Roy H., Mondal B., Murmu N.C., and Mukhopadhyay S.K.: Mathematical Modeling of Wear Characteristics of 6061 Al-Alloy-SiCp Composite Using Response Surface Methodology, *Journal of Materials Engineering and Performance* 21 (2012), 17–24.
8. Helmetag K.: Lubrication Formulation: Developing a Simple Model. *Tribology & Lubrication Technology*, January 2004, 20-24.
9. Drabik J., Trzos M.: Modelling relation between oxidation resistance and tribological properties of non-toxic lubricants with the use of artificial neural networks. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2012, nr 109, pp. 521–527.
10. Sinha A.N., Mukherjee P.S., De A.: Assessment of useful life of lubricants using artificial neural network. *Ind. Lubric. And Tribology*, vol. 52, no.3, pp. 105–109, 2000.
11. Trzos M.: Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych w modelowaniu procesu zużywania ściernego. *Tribologia* nr 3/2001 (177) 2001 s. 463–471.
12. Trzos. M: Neural models for prediction of lube oils wear resistance properties. *Tribologia* 4/2004 (196) 2004, pp. 273–284.
13. Dobosz M.: Wspomagana komputerowo statystyczna analiza wyników badań. Akademia Oficyna Wydawnicza Exit. Warszawa 2001.
14. StatSoft (2006). *Elektroniczny Podręcznik Statystyki PL*, Kraków, WEB: <http://www.statsoft.pl/textbook/stathome.html>.
15. Sidnyaev N.I., Assessment of the parameters of surface friction with the methods of the experiment design theory, *Journal of Friction and Wear*, 2009, Vol. 30, No. 2, pp. 137–141.
16. Basavarajappa S., Chandramohan G., and Paulo D.J., Some Studies on Drilling of Hybrid Metal Matrix Composites Based on Taguchi Techniques, *J. Mater. Process. Technol.*, 2008, 196, p. 332–338.
17. Sahin Y., Optimization of Testing Parameters on the Wear Behavior of Metal Matrix Composites Based on the Taguchi Method, *Mater. Sci. Eng. A*, 2005, 408, p. 1–8.
18. Ruta R., Matuszewska A., Grądkowski M.: Modelowanie wpływu dodatków AW/EP na właściwości tribologiczne środków smarowych. *Tribologia*, 2013, 2, 169–182.

## Summary

**The article presented the results of analysis of models of the wear limiting load capacity that were developed based on the experimental data. The elements of friction contacts lubricated with mineral oil with additives were investigated. Two rounds of investigation were conducted based on**

**different experimental plans, which were a plan for mixtures with limitations, and the central compositional plan. The experimental results were used to develop the models of the relationships of the wear limiting load capacity and the content of the antiwear and antiseizure additives in the lubricant. Based on the results of verification experiments, the usefulness of the experimental plans for modelling of the tribological properties was analysed and evaluated. A comparison of the quality of the regression models and the models developed with the use artificial neural networks was also presented.**