

Ryszard RUTA*

ZASTOSOWANIE METODY TAGUCHIEGO PLANOWANIA EKSPERYMENTÓW W BADANIACH TRIBOLOGICZNYCH

APPLICATION OF TAGUCHI EXPERIMENTS IN A PLANNING METHOD FOR TRIBOLOGICAL RESEARCH

Słowa kluczowe:

metoda Taguchiego, planowanie eksperymentów, metoda ball-cratering, rozrzut wyników, badania tribologiczne, optymalizacja, zużycie

Key words:

Taguchi method, experiments planning, ball-cratering method, results scatter, tribological research, optimization, wear

Streszczenie

W artykule pokazano zarys metody planowania eksperymentów opracowanej przez Taguchiego dla potrzeb optymalizacji procesów oraz przykłady jej zastosowania do rozwiązania wybranych zagadnień tribologicznych. Pokazano wykorzystanie metody Taguchiego do optymalizacji wartości parametrów metody ball-cratering, oceny odporności powłok na

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

zużycie ściernie oraz do rozwiązania problemu minimalizacji rozrzutu wyników wybranych metod badań własności tribologicznych. Przeprowadzone badania pokazały przydatność metody Taguchiego do minimalizacji rozrzutu wartości badanych cech tribologicznych. Zastosowanie metody Taguchiego do optymalizacji wielkości rozrzutu wyników badań pozwoliło na znaczące zmniejszenie liczby koniecznych eksperymentów.

WPROWADZENIE

Skuteczność i efektywność badań eksperymentalnych w dużym stopniu zależy od umiejętności zastosowania nowoczesnych metod planowania eksperymentów, które nie tylko pozwalają na znaczące ograniczenie liczby eksperymentów, ale także umożliwiają uzyskania wartościowych i wiarygodnych informacji dotyczących przedmiotu badań. Podstawowym problemem w stosowaniu tego typu metod jest nie tylko dobór metody, odpowiedniej do rozwiązywanego zagadnienia i właściwe jej zastosowanie, ale także prawidłowa obróbka i interpretacja wyników, uzyskanych z przeprowadzanych eksperymentów.

Spośród wielu metod na szczególną uwagę zasługuje metoda, a właściwie podejście metodyczne zaproponowane przez Taguchiego mające na celu eksperymentalną optymalizację jakości wieloparametrowych procesów i obiektów technicznych. Podejście to umożliwia w istotny sposób ograniczenie liczby eksperymentów, niezbędnych do zbadania wpływu wielu zmiennych eksperymentu na właściwości badanego obiektu.

Zastosowanie nowoczesnych metod projektowania eksperymentów w tribologii, będącej w swej istocie nauką eksperymentalną, jest ze wszech miar uzasadnione oraz powinno usprawnić i zwiększyć efektywność badań tribologicznych.

METODA TAGUCHIEGO

Zasadniczym celem metody opracowanej przez G. Taguchiego była optymalizacja jakości wyrobów (procesów technologicznych) poprzez dobór odpowiednich wartości istotnych cech wyrobu lub parametrów procesu technologicznego. Punktem wyjścia Taguchiego było skupienie uwagi przede wszystkim na konsekwencjach straty jakości, zamiast powszechnie stosowanego w tej dziedzinie dążenia do zwiększenia samej jakości. Zauważył on, że każdy produkt w procesie użytkowania generuje określoną stratę, której wielkość jest odwrotnie proporcjonalna do jakości

wyrobu, co jego zdaniem uzasadnia przyjęcie jako głównego miernika spadku jakości wyrobu wzrost strat użytkownika. Strat rozumianych bardzo szeroko i obejmujących zarówno niezadowolone konsumenta, jak również straty producenta spowodowane niekorzystnym wizerunkiem prowadzącym w dłuższym okresie nawet do utraty rynków zbytu. Metoda opracowana przez Taguchiego na podstawie tych założeń może być stosowana zarówno do optymalizacji nowego produktu (procesu), jak i do doskonalenia obiektów już istniejących. Na etapie projektowania pozwala zaprojektować produkt, który zaspokaja zarówno potrzeby klienta, jak i umożliwia minimalizację kosztów firmy. Szczególnie efektywnie metoda ta może być wykorzystana do projektowania właściwości produktów i parametrów procesów ukierunkowanych na uzyskiwanie maksymalnej „odporności” na różnego rodzaju zakłócenia, zarówno podczas wytwarzania produktów, jak i ich eksploatacji.

Nie wnikając w szczegóły, podstawowe znaczenie w metodzie Taguchiego odgrywają pojęcia: funkcji straty, jakości współczynnika stosunku sygnału do szumu (S/N) oraz tablice ortogonalne [L. 1].

Utożsamiając zupełny brak jakości jako rezultat całkowitej straty zarówno użytkownika, jak i jego otoczenia z powodu odchyłeń funkcjonalnych i szkodliwych efektów ubocznych danego produktu, Taguchi ocenia jego jakość poprzez wielkość tej straty. Dalej precyzuje pojęcie jakości, określając tzw. jakość idealną produktu jako taką, przy której brak jakichkolwiek strat oraz zakłada, że stopniowe oddalanie się własności produktu od własności produktu idealnego można opisać funkcją kwadratową, co z kolei umożliwi ocenę wysiłków na rzecz poprawy jakości poprzez minimalizację kwadratów odchyłeń mierzalnych własności produktu od wartości produktu idealnego. Dalej przyjął on, że produkt o idealnej jakości zawsze powinien w taki sam sposób odpowiadać na wszelkie działania jego użytkownika oraz w jak największym stopniu być odporny na wszelkiego rodzaju czynniki zakłócające jego działanie. Wychodząc z tych przesłanek, Taguchi do mierzenia jakości przyjął minimalizację zmienności działania produktu w odpowiedzi na czynniki zakłócające N (noise factors), przy równoczesnej maksymalizacji zmienności w odpowiedzi na czynniki sygnału S (signal factors). Oba te kryteria można rozpatrywać łącznie, maksymalizując funkcję kryterium $\text{Eta} = S/N$. W zależności od rodzaju własności badanego obiektu Taguchi zaproponował wiele kryteriów typu „Im mniejsze – tym lepsze”, „im większe – tym lepsze”, „najlepsze-nominalne”, „częściowo niesprawne” i „znako-

wany cel”, dla których zaproponował pokazane poniżej funkcje kryterium.

1. **Im mniejsze – tym lepsze**, gdy celowe jest zminimalizowanie wystąpienia niepożądanych cech produktu, co umożliwia funkcja kryterium:

$$\eta = -10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right),$$

gdzie: $i = 1$ do n (liczba pomiarów)

η – współczynnik S/N;

n – liczba pomiarów dla konkretnego produktu,

y – mierzona cecha.

Należy zwrócić uwagę, na czynnik -10 , który gwarantuje, że współczynnik S/N mierzy odwrotność „złej jakości”; tzn. im większa suma kwadratów y (negatywnej cechy produktu), tym mniejszy współczynnik S/N. Czyli wartości badanych cech x_j (procesu wytwarzania), które maksymalizują współczynnik η dają najlepszą jakość.

2. **Im większe – tym lepsze** (np. wydajność, szybkość, wytrzymałość itp.), wtedy:

$$\eta = -10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right).$$

3. **Najlepsze – nominalne**, gdy pożądana jest stała wartość sygnału (wartość nominalna), a zmienność wokół tej wartości może być traktowana jako wynik działania szumu:

$$\eta = -10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i)^2}{(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i)^2} \right) = -10 \cdot \log_{10} \left(\frac{s}{\bar{y}} \right)^2.$$

Funkcja η mierzy wartość kwadratu współczynnika zmienności s/\bar{y} zdefiniowanego jako stosunek dyspersji mierzonej wielkości do jej wartości średniej.

4. **Znakowany cel**. W przypadku, gdy interesująca cecha jakościowa ma wartość 0 (zero) oraz mogą pojawić się zarówno dodatnie, jak i ujemne wartości tej cechy, funkcja kryterium eta przyjmuje postać:

$$\eta = -10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i)^2 \right) = -10 \cdot \log_{10} s^2.$$

Istotnym elementem metody Taguchiego jest system stabilizowanych planów doświadczenia, które umożliwiają obliczenie maksymalnej liczby nieobciążonych (ortogonalnych) efektów głównych przy minimalnej liczbie układów planu. Dokładniej: plan doświadczeń jest planem ortogonalnym, gdy n -wymiarowe kolumny macierzy pomiarów są względem siebie ortogonalne jako wektory w przestrzeni R^n . Plany te mają wiele zalet z punktu widzenia statystycznego. W szczególności pominięcie w modelu pewnych członów nie powoduje konieczności przeliczania oszacowań pozostałych jego parametrów, o ile tylko pomiary wykonywane były zgodnie z planem ortogonalnym dla tego modelu. Dla wielu modeli i wskaźników jakości planowania plany ortogonalne są optymalne [L. 2].

WYKORZYSTANIE METODY TAGUCHIEGO DO OPTYMALIZACJI WARTOŚCI PARAMETRÓW METODY BALL-CRATERING

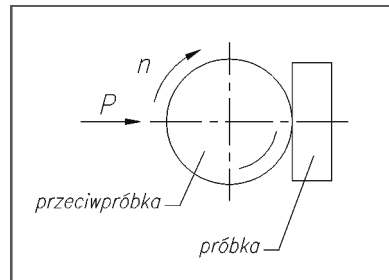
Metoda ball-cratering [L. 3–5] została zapisana w postaci projektu normy europejskiej i jest obecnie rozwijana w wielu ośrodkach badawczych dla opracowania metodyki wyznaczania parametrów umożliwiających uczynienie z niej powszechnie stosowanej metody badawczej, spełniającej wymogi odpowiedniej powtarzalności, a także, co jest niezmiernie trudne w badaniach tribologicznych, odpowiedniej odtwarzalności.

Metoda ball-cratering oceny odporności powłok (nanoszonych na trące elementy maszyn) na zużycie ściernie realizowana jest na stanowisku badawczym T-20 [L. 6]. Idea tej metody została opracowana przez międzynarodowe konsorcjum w ramach V Programu Ramowego UE. Została ona oparta na tzw. metodzie KALOTEST służącej do wyznaczania grubości powłok przez pomiar wymiarów ich wytarcia kulą w obecności węgla krzemu SiC jako ścierniwa, z uwzględnieniem możliwości zmian obciążenia i prędkości poślizgu oraz kontroli medium otaczającego badane próbki.

Stanowisko badawcze T-20 umożliwia przeprowadzenie badań pomiaru zużywania ściernego powłok. Uzyskane wyniki dostarczają danych o szybkości ściernia powłoki, jak i podłoża przez przeprowadzenie serii badań zużyciowych przy zmiennej drodze tarcia.

Węzeł tarcia urządzenia T-20 składa się z nieruchomej tarczy testowej wykonanej ze stali WCLV ($\varnothing = 25,4$ mm) dociskanej siłą P do obracającej się przeciwpróbki – kuli ($\varnothing = 25,4$ mm). Na powierzchnię płytki naniesiono powłokę przeciwzużyciową. Przeciwpróbkę stanowiła kulka

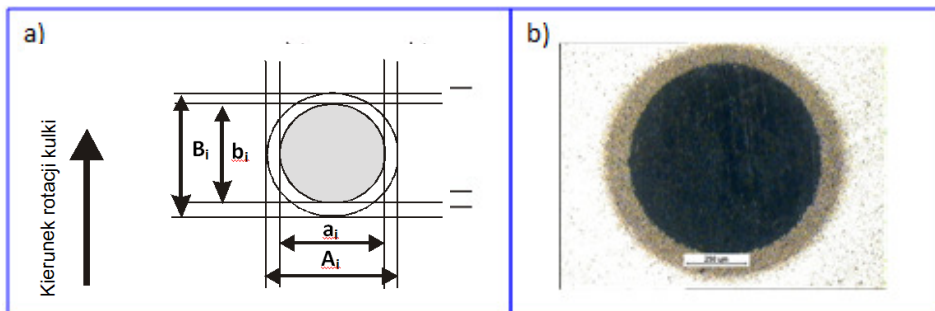
łożyskowa wykonana ze stali ŁH15. Ścierniwo stanowił proszek SiC, dostarczany do strefy styku w postaci 20% zawiesiny w wodzie destylowanej. Schemat węzła tarcia maszyny badawczej T-20 pokazano na **Rys. 1**. W badaniu kula dociśnięta do próbki (tarcza), obraca się na powierzchni próbki. Do strefy kontaktu kula/tarcza doprowadzona jest zawiesina proszku ściernego SiC. W efekcie zużycia uzyskuje się kuliste wgłębienie – krater, którego wielkość jest mierzona z użyciem mikroskopu pomiarowego.



Rys. 1. Schemat węzła tarcia maszyny badawczej T-20

Fig. 1. The chart of the friction contact of T-20 tribotester

Sposób pomiaru średnic śladów zużycia na powierzchni próbki (a_i , b_i – średnice wewnętrzne A_i , B_i – średnice zewnętrzne i-tego krateru) pokazano na **Rys. 2a**, a na **Rys. 6b** obraz krateru, wykorzystywany do pomiaru średnic śladów kraterów, sfotografowany za pomocą pomocy optycznego mikroskopu pomiarowego Nikon MM-40 na.



Rys. 2. Ślad zużycia powłoki: a) pomiar średnic śladu zużycia, b) przykład krateru po biegu badawczym

Fig. 2. The coating wear track a) measurement of wear; b) examples of crater

Warunkiem poprawności zastosowania metody ball-cratering jest uzyskanie czterech kraterów (w czterech biegach badawczych), dla których błędy względne średnic wewnętrznych δa_i i zewnętrznych δA_i obliczonych według poniższych wzorów nie mogą przekraczać 10%, co można zapisać w postaci warunku:

$$\delta a_i = \left| \frac{a_i - b_i}{a_i + b_i} \right| < 0,1 \quad \text{i} \quad \delta A_i = \left| \frac{A_i - B_i}{A_i + B_i} \right| < 0,1$$

dla $i = 1, 2, 3, 4$.

gdzie: i oznacza nr krateru.

Na potrzeby oceny wyników metody ball-cratering wykorzystano rozrzut błędów względnych średnic kraterów mierzony za pomocą odchylenia standardowego:

$$\text{Stdev}(\delta A; \delta a) = \sqrt{\frac{1}{6-1} \left(\sum_{i=1}^3 (\delta A_i - \text{mean}(\delta A; \delta a))^2 + \sum_{i=1}^3 (\delta a_i - \text{mean}(\delta A; \delta a))^2 \right)}$$

Przedmiotem badania metody ball-cratering była powłoka TiAlN. Na podstawie badań wstępnych określono następujące wartości parametrów: obciążenie [N] {0,2; 0,4; 0,6}, pręđ. obrot. [rpm] {38; 80; 150}, droga min. [m] {48; 54; 60} i droga maks. [m] {100; 108; 116}. Dla wyżej wymienionych wartości parametrów metody ball-cratering za pomocą procedury „Planowania eksperymentów (DOE)” programu statystycznego STATISTICA 9 wygenerowano podstawowy plan eksperymentów składający się z 9 układów, który został czterokrotnie powtórzony w przeprowadzonych badaniach.

Droga 1 jest drogą minimalną, droga 4 maksymalną, a drogi 2 i 3 zostały wyznaczone według wzorów:

$$\text{droga 2} = \text{droga min.} + (\text{drog maks.} - \text{drog min.})/3,$$

$$\text{droga 3} = \text{droga maks.} - (\text{drog maks.} - \text{drog min.})/3.$$

W **Tabeli 1** pokazano część wyników podstawowego planu eksperymentów optymalizacyjnych, zawierających wartości średnic A_1 , B_1 , a_1 i b_1 krateru pierwszego (uzyskanego po drodze min) oraz wartości średnic A_2 , B_2 , a_2 i b_2 krateru drugiego (uzyskanego po drodze 2).

Po zbadaniu wszystkich układów (plan podstawowy + cztery powtórzenia) planu eksperymentów optymalizacyjnych obliczono błędy względne δa_i i δA_i średnic kraterów. W dalszym ciągu zgodnie z wy-

tycznymi podejścia Taguchiego dla każdego eksperymentu obliczono wartość funkcji kryterium „im mniejsze, tym lepsze” według wzoru:

$$\eta = -10 * \log((\text{Stdev}(\delta A - \delta a))^2).$$

W celu zbadania wpływu poszczególnych parametrów metody na wartość rozrzutu błędów względnych wykorzystano wieloczynnikową analizę wariancji. W ramach wieloczynnikowej analizy wariancji dla każdego czynnika (parametru metody) formułuje się hipotezy zerowe H_0 zakładające równość średnich wartości funkcji kryterium η wyznaczoną dla kolejnych wartości badanego parametru π :

$$H_0: \bar{\eta}(\pi_1) = \bar{\eta}(\pi_2) = \bar{\eta}(\pi_3),$$

gdzie: $\bar{\eta}(\pi_i)$ – wartość średnia funkcji kryterium η wyznaczona dla i-tej wartości parametru π ,

π – oznacza jeden z parametrów; powtórzenie, obciążenie, prędkość obrotowa, droga min., droga maks.

Tabela 1. Parametry kraterów 1 i 2 podstawowego planu eksperymentów optymalizacyjnych

Table 1. Crater parameters of the 1 and 2 basic optimization experiment plan

Powłoka TiAlN															
Nr	PARAMETRY							Krater 1				Krater 2			
	Powł.	Obciążenie	droga 1	droga 2	droga 3	droga 4	pręđ	A1	B1	a1	b1	A2	B2	a2	b2
1	1	0,2	48	65	83	100	38	0,994	1,022	0,848	0,877	1,168	1,180	1,027	1,060
2	1	0,2	54	72	90	108	80	1,08	1,088	0,955	0,956	1,142	1,152	0,989	0,987
3	1	0,2	60	79	97	116	150	0,755	0,823	0,635	0,676	0,880	0,908	0,730	0,750
4	1	0,4	48	68	88	108	150	1,225	1,23	1,09	1,118	1,300	1,277	1,170	1,170
5	1	0,4	54	75	95	116	38	1,355	1,321	1,212	1,236	1,426	1,420	1,317	1,283
6	1	0,4	60	73	87	100	80	1,296	1,29	1,144	1,18	1,390	1,399	1,269	1,290
7	1	0,6	48	71	93	116	80	1,202	1,206	1,038	1,083	1,420	1,435	1,296	1,343
8	1	0,6	54	69	85	100	150	1,484	1,522	1,375	1,372	1,600	1,573	1,439	1,447
9	1	0,6	60	76	92	108	38	1,363	1,336	1,234	1,231	1,550	1,497	1,418	1,418

Dalej, zgodnie z zasadami analizy wariancji dla każdego parametru π , wykorzystując test F Fishera, weryfikuje się hipotezę H_0 wobec hipotezy alternatywnej:

$$H_1: \text{nie wszystkie wartości } \bar{\eta}(\pi_i) \text{ są równe.}$$

Warunkiem odrzucenia hipotezy H_0 i tym samym przyjęcie hipotezy alternatywnej H_1 jest, aby wartość statystyki F wyznaczonej na podstawie wyników badań była większa od wartości krytycznej F^* wyznaczonej teoretycznie, przy założeniu o równości $\bar{\eta}(\pi_i)$ dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0,05$ lub, co jest równoznaczne, aby wartość prawdopodobieństwa testowego p była mniejsza od $0,05$. Wyniki wieloczynnikowej analizy wariancji pokazano w **Tabeli 2**.

Tabela 2. Wyniki wieloczynnikowej analizy wariancji wpływu wartości parametrów metody na wartość funkcji kryterium

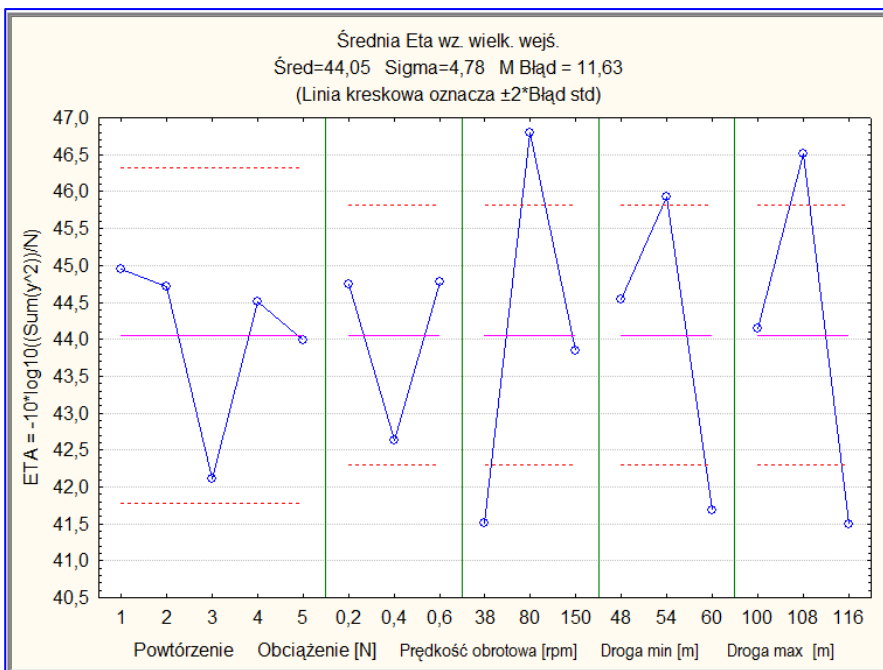
Table 2. Results of the multifactorial variation analysis of the method parameters value influence on criterion function value

Efekt	Analiza wariancji (TiAIN 58 108 w Ball-cratering Śred = 44,05 Sigma = 4,78)				
	SS	df	MS	F	p
{1}Powtórzenie	47,13	4	11,78	1,02	0,414
{2}Obciążenie [N]	45,49	2	22,74	1,96	0,157
{3}Prędkość obrotowa [rpm]	210,40	2	105,20	9,06	0,001
{4}Droga min [m]	140,01	2	70,00	6,03	0,006
{5}Droga max [m]	190,12	2	95,06	8,19	0,001
Reszta	371,38	32	11,61		

Zgodnie z wynikami pokazanymi w **Tabeli 2** w przypadku parametru „powtórzenie” i obciążenie” uzyskane wyniki nie dają podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej, o równości wartości średniej wyznaczonej dla kolejnych wartości badanych parametrów, co w przypadku parametru „powtórzenie” jest bardzo dobrą wiadomością, ponieważ uzyskane wyniki nie powinny w istotny sposób różnić się w kolejnych powtórzeniach układów planu eksperymentów. Natomiast w przypadku parametru „obciążenie” wiemy tylko, że w badanym zakresie wartości nie można stwierdzić istotnego statystycznie na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ wpływu tego parametru na wartość funkcji kryterium. Może to być rezultatem braku takiego oddziaływania lub efektem zbyt małej liczby powtórzeń w przypadku „słabszego” oddziaływania wyrażającego się mniejszym zróżnicowaniem obliczonych wartości średnich funkcji η . Rozstrzygnięcie tego dylematu wymaga przeprowadzenia dodatkowych badań. Niska (w stosunku do poziomu istotności $\alpha = 0,05$) wartość prawdopodobieństw testowych p w przypadku parametrów; „prędkość obrotowa”, „droga min.” i „droga maks.” pozwala z dużym prawdopodobieństwem stwierdzić istotność wpływu tych parametrów (w ba-

danym zakresie wartości) na wartość funkcji kryterium oceniającą rozrzut błędów względnych średnic kraterów.

Z powodu wykluczenia interakcji pomiędzy parametrami spowodowanego wykorzystaniem tablic ortogonalnych w planach eksperymentów można na podstawie uzyskanych wyników wnioskować o wyłącznym wpływie poszczególnych parametrów na funkcję kryterium. Analizując wartości średnie funkcji kryterium η w postaci graficznej na **Rys. 3** można zauważyć, że funkcja kryterium η osiąga wartość maksymalną, przy której rozrzut błędów powinien być minimalny dla następujących wartości parametrów metody; obciążenie (0,6 N), pręđ. obrot. (80 obr./min), droga min. (54 m) i droga maks. (108 m).



Rys. 3. Wykres wartości średnich funkcji kryterium η

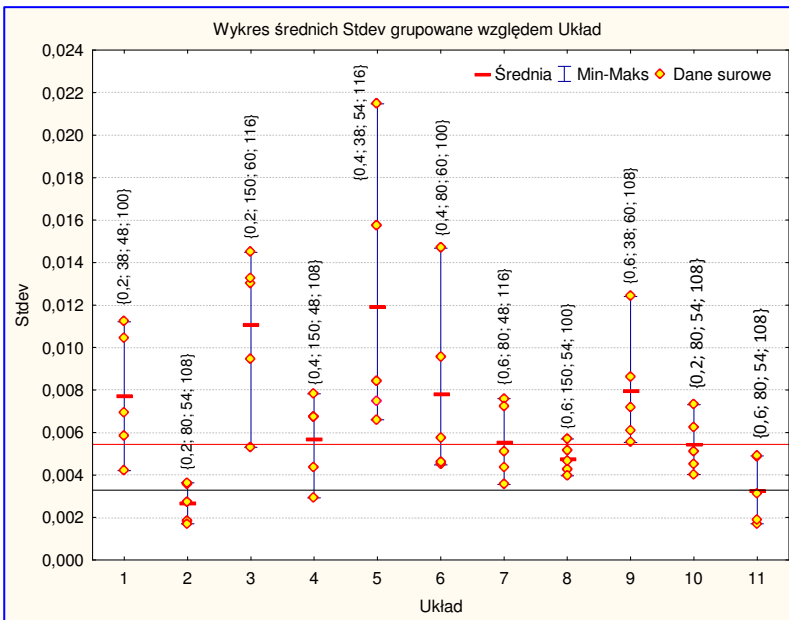
Fig. 3. Chart of the average values of criterion function η

Zgodnie z wymogami metody Taguchiego wyznaczone wartości optymalne należy poddać weryfikacji empirycznej potwierdzającej uzyskane wyniki lub wskazującej na konieczność powtórzenia procesu optymalizacji przy innych wartościach parametrów.

Ponieważ parametr „obciążenie” (**Tabela 2**) jest nieistotny statystycznie oraz wartość funkcji kryterium dla wartości 0,2 i 0,6 N niewiele się różni, postanowiono zweryfikować dwa dodatkowe układy eksperymentów weryfikacyjnych przy różnych wartościach obciążeniach przy jednakowych wartościach pozostałych parametrów metody {obciążenie; prędkość obrotowa; droga min.; droga maks.} równe odpowiednio: układ 10 – {0,2 N; 80 obr./min; 54 m; 108 m} i układ 11 – {0,6 N; 80 obr./min; 54 m; 108 m}.

Dla każdego układu eksperymentów weryfikacyjnych wykonano 5 eksperymentów. Dla każdego zestawu błędów względnych średnic kraterów wyznaczono wartość odchylenia standardowego, które porównano z wartościami odchyżeń standardowych uzyskanych we wcześniejszych eksperymentach optymalizacyjnych.

Na wykresie przedstawionym na **Rys. 4** pokazano wartości odchyżeń standardowych błędów względnych wyznaczonych w rezultacie 5 powtórzeń każdego układu eksperymentów, ich wartość średnią dla każdego układu oraz w nawiasach klamrowych wartości parametrów każdego układu w formacie {obciążenie; prędkość obrotowa; droga min.; droga maks.}.



Rys. 4. Wykres odchyżeń standardowych błędów względnych średnic kraterów
Fig. 4. Chart of standard deviations of the craters diameters relative errors

Układy 1–9 zawierają wykresy odchyień staandardowych układów eksperymentów optymalizacyjnych, a układy 10 i 11 rezultaty otrzymane w eksperymentach weryfikacyjnych. Analizując wyniki pokazane na **Rysunku 6**, można sformułować następujące spostrzeżenia:

1. Wartość średnia odchyień standardowych błędów względnych wyznaczonych w rezultacie 5 powtórzeń układu 11 optymalnych wartości parametrów metody ball-cratering uzyskanych metodą Taguchiego jest tylko nieznacznie większa od wartości średniego odchylenia standardowego wyznaczonego dla rezultatów układu 2.
2. Prawie wszystkie wartości odchyień standardowych błędów względnych średnic kraterów wyznaczonych dla układów 1, 3–9 są większe od wszystkich odchyień standardowych błędów względnych średnic kraterów układu 10.
3. Wartość średnia odchyień standardowych błędów względnych wyznaczonych w rezultacie 5 powtórzeń układu 10 jest większa od wartości średniego odchylenia standardowego wyznaczonego dla rezultatów układów 2, 4, 7 i 8, a mniejsza od pozostałych 5 układów.

Na podstawie sformułowanych spostrzeżeń można przyjąć, że eksperyment weryfikacyjny potwierdził istotność wpływu wartości parametrów: prędkość obrotowa, droga min. i droga maks. na rozrzut błędów względnych średnic kraterów śladów zużycia otrzymanych na urządzeniu T-20 w rezultacie badań zrealizowanych według zasad metody ball-cratering. Przy czym wartość tego rozrzutu osiąga minimum dla: prędkości obrotowej (80 obr./min), drogi min. (54 m) i drogi maks. (108 m). Czwarty parametr obciążenie w zakresie wartości $0,2 \div 0,6$ N nie ma istotnego statystycznie (na poziomie istotności $\alpha = 0,05$) wpływu na rozrzut wartości błędu względnego średnic kraterów.

MINIMALIZACJA ROZRZUTU WYNIKÓW WYBRANYCH METOD BADAŃ WŁASNOŚCI TRIBOLOGICZNYCH

Ważnym problemem dotyczącym wiarygodności badań eksperymentalnych w ogólności, a badań tribologicznych w szczególności jest określenie wpływu warunków badań na rozrzutów uzyskanych wyników. W artykule pokazano wyniki badań tego typu wpływu dotyczącego rozrzutu badania współczynnika tarcia w zależności od takich czynników, jak: rodzaj urządzenia badawczego, rodzaj trących powierzchni, wilgotność, nacisk oraz prędkość obrotowa.

W badaniach wykorzystano testery tribologiczne T10 [L. 7] i T11 [L. 6] przeznaczone do badania podstawowych właściwości tribologicznych materiałów, które umożliwiają między innymi wyznaczenie średniego współczynnika tarcia węzła. Urządzenie T10 może pracować w ustawieniu pionowym osi obrotu, oznaczanie T10V bądź w ustawieniu poziomym T10H, natomiast T11 tylko w ustawieniu pionowym, co zaznaczono jako T11V.

Przedmiotem badań były trzy rodzaje skojarzeń trących powierzchni (S/S, S/C, P/C). Pozostałe czynniki również przyjmowały jeden z trzech możliwych poziomów, wilgotność odpowiednio (35, 50 i 80%), nacisk (5, 10 i 15N) i prędkość obrotowa (0,1; 0,2 i 0,3 m/s).

Tabela 3. Plan eksperymentu optymalizującego rozrzut wyników badań tribologicznych

Table 3. Plan of the optimization experiment of the tribological results scatter

1 Plan	2 Skojarzenie	3 Wilgotność H [%]	4 Nacisk N [Newtons]	5 Prędkość v [m/s]
T10H	S/S	35	5	0,1
T10H	S/S	50	10	0,2
T10H	S/S	80	15	0,3
T10H	S/C	35	10	0,3
T10H	S/C	50	15	0,1
T10H	S/C	80	5	0,2
T10H	P/C	35	15	0,2
T10H	P/C	50	5	0,3
T10H	P/C	80	10	0,1
T11V	S/S	35	5	0,1
T11V	S/S	50	10	0,2
T11V	S/S	80	15	0,3
T11V	S/C	35	10	0,3
T11V	S/C	50	15	0,1
T11V	S/C	80	5	0,2
T11V	P/C	35	15	0,2
T11V	P/C	50	5	0,3
T11V	P/C	80	10	0,1
T10V	S/S	35	5	0,1
T10V	S/S	50	10	0,2
T10V	S/S	80	15	0,3
T10V	S/C	35	10	0,3
T10V	S/C	50	15	0,1
T10V	S/C	80	5	0,2
T10V	P/C	35	15	0,2
T10V	P/C	50	5	0,3
T10V	P/C	80	10	0,1

W celu zastosowania podejścia Taguchiego do rozwiązania problemu minimalizacji rozrzutu wyników badań własności tribologicznych zaprojektowano 27 eksperymentów, których plan pokazano w **Tabeli 3**.

Na potrzeby minimalizacji rozrzutów wyników z testów tribologicznych naturalnym okazało się kryterium „im mniejsze – tym lepsze”, przeznaczone do zminimalizowania wystąpienia niepożądanych cech produktu.

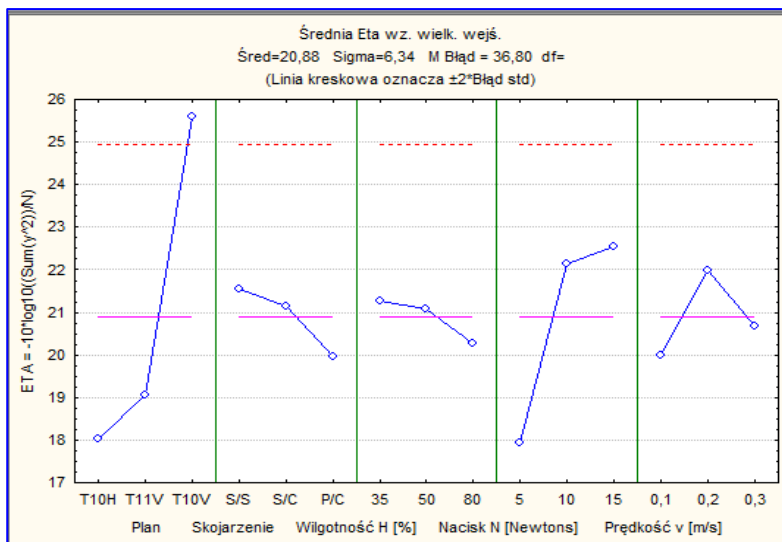
W celu zbadania wielkości rozrzutu każdy układ zaplanowanego eksperymentu powtórzono 5 razy oraz zbadano różne miary rozrzutu.

Ostatecznie wartości parametrów eksperymentu optymalizujące kryterium „im mniejsze – tym lepsze” wyznaczono dla funkcji:

$$\eta = -10 * \log_{10} [(1/n) * \Sigma (y_i^2)],$$

w której suma $\Sigma(y_i^2)$ – obejmowała wartości bezwzględne wszystkie różnic pomiędzy wyznaczonymi w eksperymentach wartościami współczynnika tarcia (zużycia).

Na podstawie analizy wartości współczynnika tarcia wyznaczono wpływ wartości parametrów przeprowadzonych eksperymentów na wartość funkcji η , który pokazano na **Rys. 4**.



Rys. 4. Zależność średniej wartości funkcji Eta rozrzutu wartości współczynnika tarcia

Fig. 4. Relation of average value of η function of the scatter of the friction coefficient value

Zgodnie z podejściem Taguchiego jako parametry minimalizujące rozrzut wyników współczynnika tarcia wybrano: T10V; S/S; 35; 15; 0,2.

Na podstawie analizy wariancji (**Tabela 4**) można stwierdzić, że tylko parametr „plan” ma istotnie statystyczny (na poziomie $\alpha = 0,05$) wpływ na rozrzut wartości współczynnika tarcia.

Tabela 4. Analiza wariancji wartości funkcji η rozrzutu wartości współczynnika tarcia w zależności od wartości parametrów badań tribologicznych

Table 4. Variation analysis of value of η function of the scatter of the friction coefficient value depending on tribological research parameters value

Efekt	Analiza wariancji (r: m6-m10) Śred = 20,88 Sigma = 6,34				
	SS	df	MS	F	p
{1}Plan	304,06	2	152,03	4,13	0,036
{2}Skojarzenie	12,33	2	6,16	0,17	0,847
{3}Wilgotność H [%]	5,00	2	2,50	0,07	0,935
{4}Nacisk N [Newtons]	117,15	2	58,57	1,59	0,234
{5}Prędkość v [m/s]	18,52	2	9,26	0,25	0,781
Reszta	588,87	16	36,80		

Dla wyznaczonych wartości parametrów minimalizujących odchylenia wyników badań współczynnika tarcia przeprowadzono eksperyment weryfikacyjny, którego rezultaty pokazano w **Tabeli 5**.

Tabela 5. Rezultaty eksperymentu weryfikacyjnego parametrów minimalizujących wartości rozrzutu współczynnika tarcia

Table 5. The results of verification experiment of the parameters that minimized the scatter value of friction coefficient

Parametry					Współczynnik tarcia					σ
Plan	Skojarz.	Wilg. [%]	Nacisk [N]	Prd. obr. [m/s]	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5	
T10V	S/S	35	15	0,2	0,456	0,545	0,489	0,553	0,478	0,043

Rozrzut wartości współczynnika tarcia, oszacowany za pomocą odchylenia standardowego wartości współczynników tarcia zmierzonych w eksperymencie weryfikacyjnym i równy 0,043, przewyższał wartość uzyskaną w przeprowadzonych wcześniej 27 eksperymentach badawczych tylko w 3 przypadkach.

PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że zastosowanie metody Taguchiego do optymalizacji parametrów eksperymentalnego procesu badawczego pozwoliło na wyznaczenie wartości parametrów minimalizujących rozrzut wartości badanych cech tribologicznych.

Zastosowanie metody Taguchiego do optymalizacji wielkości rozrzutu wyników badań współczynnika tarcia pozwoliło na znaczące zmniejszenie liczby eksperymentów, w analizowanym przypadku z 243 do 27 układów.

Pozytywna eksperymentalna weryfikacja uzyskanych rozwiązań wskazuje na dużą przydatność zastosowanej metody przy rozwiązywaniu problemów oceny i minimalizacji rozrzutu wyników w badaniach eksperymentalnych.

LITERATURA

1. Mitra A.: *Fundamentals of Quality Control and Improvement*. 3rd edition. Hoboken, NJ: Wiley, 2008.
2. STATISTICA PL dla Windows (Tom IV): *Statystyki przemysłowe*. StatSoft. Kraków 1997.
3. Gee M.G., Gant A. J, Hutchings I. M, Kusano Y., Bethke R., Schiffman K., Van Acker K., Poulat, Y. Gachoń, von Stebut J., Hatto P., Plint G.: Results from an interlaboratory exercise to validate the micro-scale abrasion test. *Wear* 259 (2005), 27–35.
4. Batista J.C.A., Matthews A., Godoy C.: Micro-abrasive wears of PVD duplex and single-layered coatings. *Surface and Coatings Technology* 142–144 (2001), 1137–1143.
5. Batista J.C.A., Godoy C., Matthews A.: Micro-scale abrasive wear testing of duplex and non-duplex (single-layered) PVD (Ti,Al)N, TiN and Cr-N coatings. *Tribology International* 35 (2002), 363–372.
6. <http://www.itee.radom.pl/oferta/aparatura.htm>.
7. Szczerek M.: *Metodologiczne problemy systematyzacji eksperymentalnych badań tribologicznych*. Wyd. ITeE, 1997.

Recenzent:
Jan WALKOWICZ

Summary

The article presents the Taguchi method elaborated for process optimisation and its application in the area of tribology. Examples are presented of the method application for the optimisation of the parameters value of the ball-cratering method used for the abrasion testing of surface engineered materials and for solving the problem of the results scatter minimisation of the chosen tribological research methods. The research results proved the Taguchi method's usefulness for scatter minimisation of the value of investigated tribological characteristics. Application of Taguchi method for scatter value optimisation enables one to decrease the number of needed experiments.