

Edyta OSUCH-SŁOMKA*, Ryszard RUTA*

ZASTOSOWANIE CENTRALNYCH ROTATABILNYCH PLANÓW KOMPOZYCYJNYCH W OPTYMALIZACJI PARAMETRÓW METODY BALL-CRATERING

APPLICATION OF THE CENTRAL COMPOSITE ROTATABLE DESIGN IN THE OPTIMISATION OF PARAMETERS OF A BALL-CRATERING METHOD

Słowa kluczowe:

metoda ball-cratering, powłoka przeciwzużyciowa, centralne rotabilne plany kompozycyjne, funkcja użyteczności

Key words:

ball-cratering method, antiwear coating, central composite rotatable design, utility function

Streszczenie

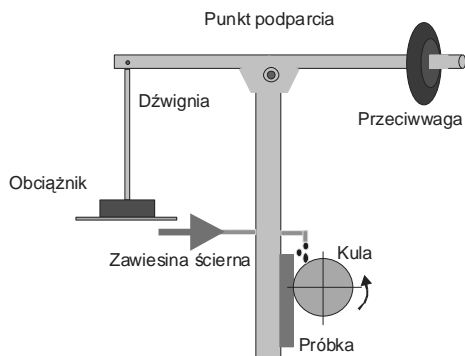
Artykuł przedstawia propozycję wykorzystania centralnych rotabilnych planów kompozycyjnych [L. 1–5] do wyznaczenia optymalnych wartości parametrów metody ball-cratering i badania zużywania ściernego powłok przeciwzużyciowych. Pokazano zestawy wartości parametrów metody ball-cratering wyznaczone jako układy planu rotabilnego eksperymentu kompozycyjnego. Na pod-

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

stawie pomiaru średnic śladów zużycia uzyskanych dla wyznaczonych zestawów wartości parametrów metody zidentyfikowano zależności maksymalnych błędów względnych średnic zewnętrznej i wewnętrznej oraz grubości pierścienia śladu zużycia jako funkcje kwadratowe parametrów metody. Wykorzystując funkcję użyteczności, wyznaczono wartości parametrów metody maksymalizujące łączną użyteczność uwzględniającą minimalizację błędu względnego i maksymalizację grubości pierścienia. Wyznaczone parametry pracy węzła tarcia zostały zastosowane do przeprowadzenia biegów tribologicznych mających na celu wyznaczenie współczynnika zużywania ściernego gradientowej powłoki przeciwzużyciowej TiN/TiCN.

WPROWADZENIE

Istotą metody ball-cratering oceny odporności powłok (nanoszonych na trące elementy maszyn) na zużycie ściernie jest pomiar średnic śladów wytarcia w kształcie kraterów. Badania przeprowadzono na stanowisku badawczym T-20 (**Rys. 1**), które umożliwia wyznaczenie zużywania ściernego powłoki i podłoża przez przeprowadzenie serii badań zużyciowych przy zmiennej drodze tarcia. Idea metody ball-cratering została opracowana przez międzynarodowe konsorcjum w ramach 5. Programu Ramowego UE. Została ona zapisana w postaci projektu normy europejskiej [L. 11] i jest obecnie rozwijana w wielu ośrodkach badawczych dla sprecyzowania parametrów umożliwiających uczynienie z niej powszechnie stosowanej metody badawczej, spełniającej wymogi odpowiedniej powtarzalności.



Rys. 1. Schemat zestawu badawczego do badania zużycia ściernego powłok [L. 9]

Fig. 1. Schematic layout illustrating the geometry of the micro-abrasion apparatus [L. 9]

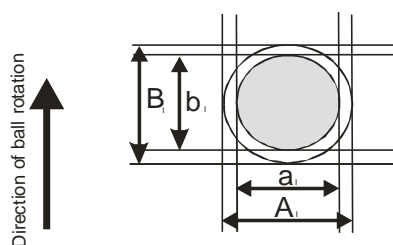
Skuteczność oraz efektywność metody ball-cratering determinowana jest wartościami parametrów warunków pracy węzła tarcia: obciążeniem [N] (siłą, z jaką próbka jest dociśnięta do kuli), prędkością obrotową [obr./min], z jaką kula obraca się na powierzchni próbki oraz czterema drogami tarcia [m], jakie

punkt na średnicy obracającej się kuli pokonuje z zadaną prędkością obrotową w przebiegach testowych. Do strefy kontaktu kula/tarcza doprowadzana jest zawiesina ścierna węgla krzemu. W efekcie zużywania uzyskuje się kuliste wgłębienie – krater (**Rys. 2**), którego wielkość jest mierzona z użyciem optycznego mikroskopu pomiarowego.

Warunkiem poprawności zastosowania metody ball-cratering [L. 6–7, 9, 11–12] jest uzyskanie czterech kraterów (dla czterech różnych dróg), których błędy względne średnic wewnętrznych δ_i i zewnętrznych Δ_i (obliczonych według poniższych wzorów) nie powinny przekraczać 10%, co można zapisać w postaci warunku:

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

gdzie: $i = 1, 2, 3, 4$, i – krater śladu uzyskanego na i -tej drodze.



Rys. 2. Pomiar średnic śladu zużycia [L. 6]

Fig. 2. Measurement of crater with perforation of coating [L. 6]

Podstawowym problemem, jaki należy rozwiązać przed zastosowaniem metody ball-cratering do badania odporności na zużycie ścierną konkretną powłoki PVD jest dobór wartości parametrów metody (obciążenie, prędkość obrotowa, droga 1, droga 2, droga 3 i droga 4) gwarantujących uzyskanie śladów o jak najmniejszych błędach względnych δ_i i Δ_i oraz o odpowiednio szerokich¹ pierścieniach $\rho_i = (A_i + B_i)/2 - (a_i + b_i)/2$.

W celu wyznaczenia wartości parametrów gwarantujących uzyskanie zadowalających śladów zużycia wykorzystano metodę planowania eksperymentów kompozycyjnych, stawiając sobie za cel identyfikację zależności pomiędzy wartością błędu względnego średnic kraterów śladów oraz grubości pierścienia a wartościami parametrów metody.

¹ Kryterium maksymalizacji grubości pierścienia dodatkowo przyjęli autorzy, uważając, że im większa grubość pierścienia, tym mniejszy błąd odczytu grubości pierścienia wykorzystywanej w obliczeniach współczynnika zużycia K_c .

Sposób zastosowania metody planowania eksperymentów kompozycyjnych do wyznaczenia optymalnych wartości parametrów metody ball-cratering pokazano na przykładzie gradientowej powłoki przeciwzużyciowej TiN/TiCN, na której przeprowadzono serię badań odporności na zużywanie ściernie według przygotowanego planu eksperymentu. Wyniki badań testowych pozwoliły zidentyfikować powierzchnię odpowiedzi [L. 8–10, 14–15] błędów względnych δ_i i Δ_i oraz grubości pierścieni ρ_i w zależności od wartości parametrów metody ball-cratering, na podstawie której, wykorzystując funkcję użyteczności, dokonano wyboru wartości parametrów optymalnych dla badanej powłoki.

MATERIAŁY DO BADAŃ

Badaniu poddano próbki w postaci płytki o średnicy 25,4 mm i grubości 10 mm, wykonane ze stali WCLV (DIN X40CrMoV5-1, ASTM H13) o twardości 55 HRC. Na płytki naniesiono powłokę gradientową TiN/TiCN o właściwościach podanych w **Tabeli 1**. Przeciwpróbkę stanowiła kulka łożyskowa o średnicy 25,4 mm, wykonana ze stali 100Cr6 (ASTM 52100, firma Dejay Distribution Limited, Wielka Brytania) o twardości $H = 58,6$ HRC i chropowości powierzchni $Ra = 0,177$ μm .

Tabela 1. Właściwości osadzonej powłoki PVD

Table 1. Properties of the PVD coating

Powłoka PVD	Grubość	Chropowość	Twardość	Moduł Younga	Utrata kohezji	Całkowita utrata adhezji
	g [μm]	Ra [μm]	HV	E [GPa]	Lc2 [N]	Lc3 [N]
TiN/TiCN gradient.	1,3	0,14	2800 \pm 120	350 \pm 20	18	49

We wszystkich przeprowadzonych badaniach ścierniwo stanowił proszek SiC (SiC/F1200-C6 wyprodukowany w Washington Mills Abrasive, Manchester, Wielka Brytania) o średniej wielkości cząstek nieprzekraczającej 4,0 μm . Do badań wykorzystano 20% roztwór SiC i wody destylowanej.

BADANIA EKSPERYMENTALNE

Wyznaczenie wartości parametrów gwarantujących uzyskanie zadowolających śladów zużycia poprzedzono eksperymentem identyfikacyjnym mającym na celu wyznaczenie matematycznego modelu zależności pomiędzy wartością błędu względnego średnic kraterów śladów oraz grubością pierścienia śladów zużycia a wartościami parametrów metody ball-cratering.

Na podstawie badań własnych [L. 6, 9–10, 12] jako obszar identyfikacji ww. funkcji przyjęto następujące zakresy wartości parametrów metody: obciążenie [0,1 N; 0,5 N], prędkość obrotowa [20 obr./min; 150 obr./min], droga [5 m; 50 m].

Dla wyżej wymienionych zakresów wartości parametrów metody ball-cratering za pomocą programu statystycznego STATISTICA [L. 13] wygenerowano podstawowy plan rotabilny składający się z 16 układów (8 układów planu 2³, 6 układów gwiazdnych i 2 układów centralnych) (Tab. 2), który został powtórzony dwa razy w badaniach eksperymentalnych.

Tabela 2. Plan rotabilny identyfikacji funkcji zależności wartości błędu względnego i grubości pierścienia śladu zużycia

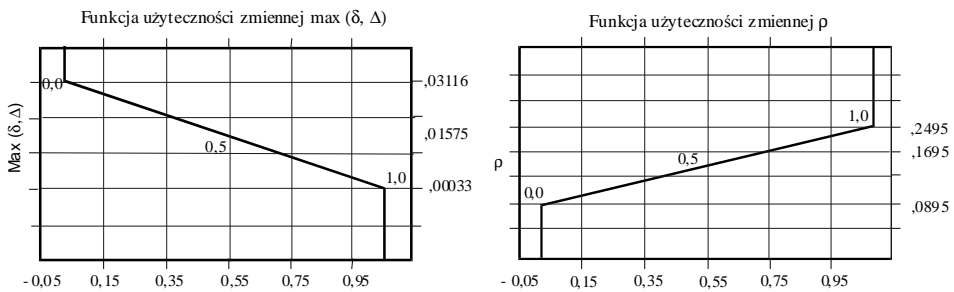
Table 2. Rotatable plan of the identification function based on the relative error and ring thickness of the wear scar

Układ rotabilny	Centralny plan kompozycyjny		
	obciążenie [N]	pręd. obr. [obr./min]	droga [m]
1	0,2	45	15
2	0,2	45	45
3	0,2	115	15
4	0,2	115	45
5	0,4	45	15
6	0,4	45	45
7	0,4	115	15
8	0,4	115	45
9	0,13	80	30
10	0,47	80	30
11	0,3	21,1	30
12	0,3	138,9	30
13	0,3	80	4,8
14	0,3	80	55,2
15 (C)	0,3	80	30
16 (C)	0,3	80	30

Po wykonaniu testów według zaplanowanego planu eksperymentów na podstawie zmierzonych wartości średnic a , b i A , B , dla każdego zestawu wartości parametrów obliczono błędy względne δ , Δ oraz grubość pierścienia ρ .

Otrzymano modele matematyczne w formie funkcji kwadratowej opisujące zależności: maksymalnego błędu względnego średnic wewnętrznej i zewnętrznej oraz grubości pierścienia w zależności od parametrów metody. W celu wyznaczenia wartości optymalnych ze względu na oba kryteria wykorzystano

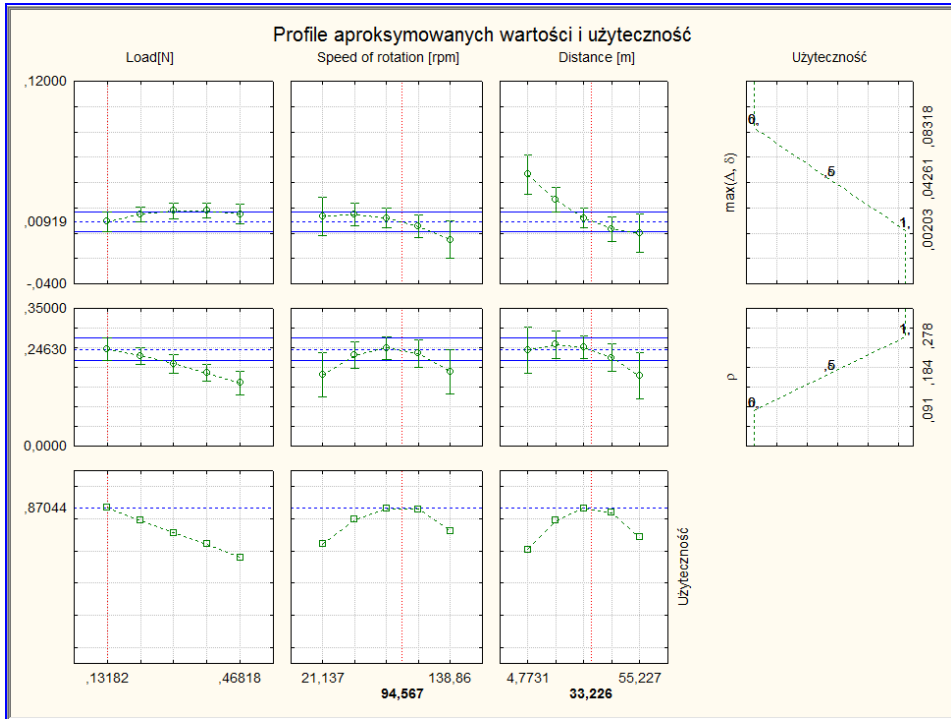
funkcję użyteczności. W najprostszym przypadku wartości każdego kryterium ocenia się za pomocą bezwymiarowej funkcji liniowej o wartościach z przedziału $[0, 1]$. Wartość 0 oznacza wartość funkcji kryterium o najmniejszej użyteczności ze względu na cel prowadzonych badań, a wartość 1 dla wartości funkcji kryterium o największej użyteczności. Za pomocą położenia wartości użyteczności 0,5 można pośrednio zwiększać lub zmniejszać wagę wartości minimalnych (maksymalnych) funkcji kryterium do wartości funkcji użyteczności. Po zdefiniowaniu funkcji użyteczności dla każdego kryterium tworzy się globalną funkcję użyteczności jak średnią geometryczną funkcji użyteczności poszczególnych kryteriów. Badając przebieg globalnej funkcji użyteczności, można uzyskać poszukiwane kompromisowe rozwiązanie. I tak dla najniższej wartości zmiennej w badanym obszarze zaproponowano zerową wartość funkcji użyteczności, dla wartości średniej 0,5 i wartość 1 dla najwyższej wartości zmiennej wyjściowej, co jest zgodne w przypadku preferowania dużych wartości analizowanej zmiennej grubości pierścienia ρ . Natomiast dla zmiennej wyjściowej $\max(\delta, \Delta)$, która powinna przyjmować małe wartości, propozycję funkcji użyteczności zmodyfikowano i dla wartości najniższej zamiast zaproponowanego 0 wpisano 1 i na odwrót, dla wartości najwyższej zamiast 1 – zero. Postać tak zdefiniowanych funkcji użyteczności pokazano na **Rysunku 3**.



Rys. 3. Wykresy funkcji użyteczności dla zmiennych $\max(\delta, \Delta)$ i ρ

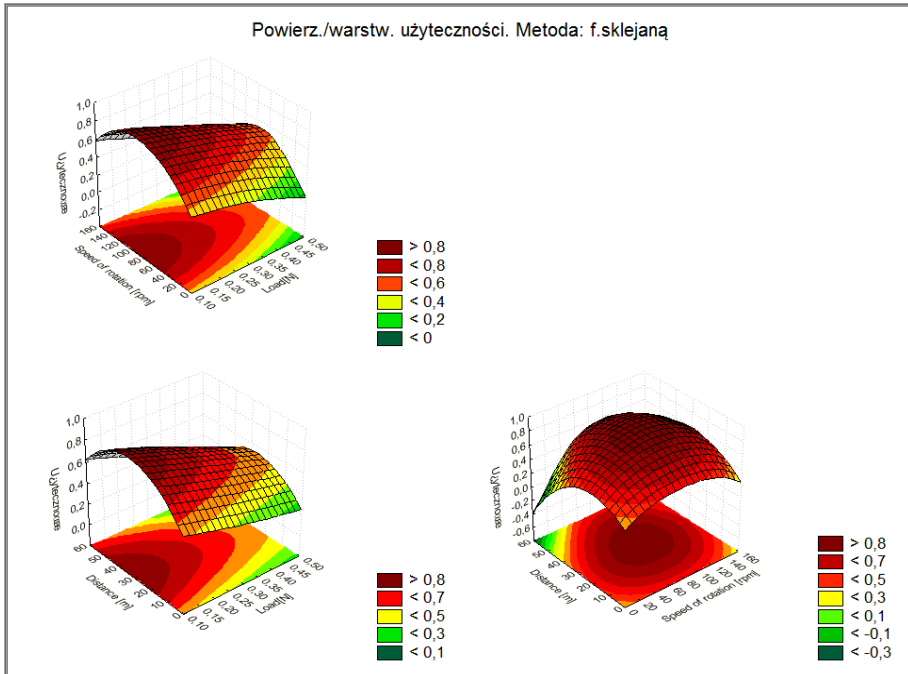
Fig. 3. Utility function charts for variables $\max(\delta, \Delta)$ and ρ

Na **Rysunku 4** przedstawiono profile aproksymowanych wartości i użyteczność. Pionową przerywaną linią zaznaczono wartości zmiennych maksymalizujących wartość użyteczności łącznej, natomiast poziomą linią kropkowaną zaznaczono poziom 0,87 użyteczności (poziom najbardziej zbliżony do jedności). Natomiast na **Rysunku 5** przedstawiono wykres przestrzenny użyteczności łącznej. Obszar o intensywnym kolorze brązowym charakteryzuje wartości użyteczności $> 0,8$, tj. powierzchnię zawierającą najkorzystniejsze wartości parametrów dla badanego obiektu badań.



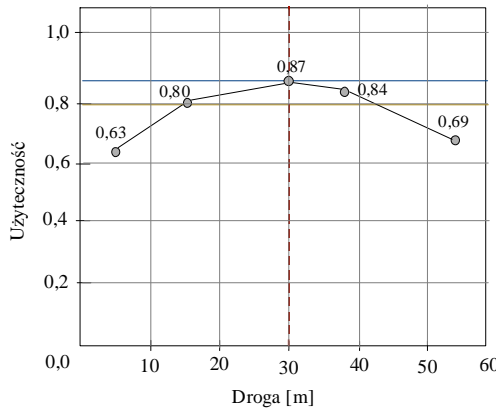
Rys. 4. Profile aproksymowanych wartości i użyteczność
 Fig. 4. Profiles of approximate values and utility

Na podstawie analizy wykresów profili aproksymowanych wartości funkcji użyteczności (**Rys. 4**), biorąc pod uwagę warunki techniczne ustalania wartości parametrów metody, jako wartość optymalną obciążenia przyjęto 0,1 [N] oraz 90 [obr./min] prędkości obrotowej. Zgodnie z wymaganiami metody ball-cratering na potrzeby badania odporności na zużywanie ściernie potrzebne są przynajmniej cztery odcinki drogi tarcia. W celu ich wyznaczenia przeanalizowano dokładnie przebieg wartości użyteczności łącznej w funkcji drogi (**Rys. 6**).



Rys. 5. Wykres przestrzenny użyteczności łącznej

Fig. 5. Dimensional graph of the total utility



Rys. 6. Wykres użyteczności łącznej w funkcji drogi tarcia

Fig. 6. Graph of total utility in function of distance

Maksymalna wartość użyteczności wynosi 0,87 dla długości drogi 30 m. W związku z tym, że do wyznaczenia współczynnika zużywania ściernego Kc są potrzebne co najmniej 4 wartości długości dróg tarcia, wybrano przedział: droga minimalna 20 m, natomiast droga maksymalna 44 m ze względu na wysoką wartość

użyteczności ($> 0,8$). Następnie podzielono otrzymany przedział dróg na równe odcinki i otrzymano cztery wartości drogi tarcia: 20 m, 28 m, 36 m, 44 m.

Dla tak wyznaczonych wartości parametrów warunków pracy węzła tarcia dla metody ball-cratering przeprowadzono eksperyment weryfikacyjny, w którym wyznaczono wartości średnic kraterów śladów zużycia, na podstawie których wyznaczono dla powłoki TiN/TiCN_{grad.} wartość współczynnika zużywania $K_c = 9,0 [10^{-13} \text{ m}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}]$.

PODSUMOWANIE

Analizując wyniki badań, stwierdzono, że:

- Przedstawiona metodyka ma na celu zaprojektowanie układów eksperymentów, których realizacja umożliwi empiryczną identyfikację funkcji obiektu, tzn. zależności opisujących oddziaływanie zbioru wielkości wejściowych na wybrane charakterystyki badanego obiektu (procesu).
- Zastosowanie metodyki ograniczone jest do obiektów, dla których w badanym obszarze zmienności funkcja kwadratowa powierzchni odpowiedzi jest zadowalającym przybliżeniem faktycznej funkcji obiektu. W przypadku gdy są przesłanki wskazujące na inną postać funkcji obiektu, należy rozważyć możliwość takiego przekształcenia zmiennych wejściowych, aby funkcja kwadratowa dla nowych zmiennych w zadowalający sposób odwzorowywała badany obiekt.
- Zastosowanie funkcji użyteczności umożliwi rozwiązywanie zagadnień polioptymalizacyjnych uwzględniających różne, często sprzeczne kryteria.
- Opracowana metodyka została pozytywnie zweryfikowana na przykładzie poszukiwania wartości parametrów metody ball-cratering spełniających kryteria minimalnego błędę względnego średnic śladów kraterów zużycia oraz maksymalnej szerokości pierścienia śladu zużycia powłoki. Uzyskane wyniki potwierdziły przydatność opracowanej metody do rozwiązywania tego rodzaju problemów.

LITERATURA

1. Cukor G., et.al.: Rotatable central composite design of experiments versus Taguchi method in the optimization of turning. *Metalurgija*, 50(2011), p. 17–20.
2. Aslan N.: Application of response surface methodology and central composite rotatable design for modeling and optimization of a multi-gravity separator for chromite concentration. *Powder Technology*, 185(2008), p. 80–86.
3. Ahmadi M., et al.: Application of the central composite design and response surface methodology to the advanced treatment of olive oil process-

- ing wastewater using Fenton's peroxidation. *Journal of Hazardous Materials B123*(2005), p. 187–195.
4. Vitanov V.I.: Application of response surface methodology for the optimization of microfriction surfacing process. *Surface and Coatings Technology*, 204 (2010), p. 3501–3508.
 5. Ashvin J., et al.: Optimisation of machining parameters for turning operations based on response surface methodology. *Measurement* 46(2013), p. 1521–15–29.
 6. Osuch-Słomka E., Ruta R., Słomka Zb.: The use of a modern method of designing experiments in ball-cratering abrasive wear testing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 227(2013), p. 1177–1187.
 7. Ruta R.: Zastosowanie metody Taguchiego do planowania eksperymentów w badaniach tribologicznych. *Tribologia* 2011, 236:125–141.
 8. Mitra A.: *Fundamentals of Quality Control and Improvement*. Macmillan Publishing Company. NY 1993, 517–543.
 9. Sprawozdanie końcowe z projektu badawczego Nr N N504 346136. Opracowanie metody do badań tribologicznych powłok przeciwzuzyciowych, Radom, ITeE – PIB 2011.
 10. Sprawozdanie końcowe z działalności statutowej. Prace laboratorium modelowania symulacyjnego systemów eksploatacji. ITeE – PIB, Radom 2011.
 11. Norma PN – EN 1071-6:2008 Techniczna ceramika zaawansowana. Metody badania powłok ceramicznych. Część 6: Oznaczanie odporności na ścieranie powłok metodą mikrościerania.
 12. Osuch-Słomka E.: Propozycja metodyki wyznaczania wartości parametrów testów dla metody ball-cratering. *Tribologia*. 2011, 240:161–171.
 13. STATISTICA PL dla Windows (Tom IV): Statystyki przemysłowe. StatSoft. Kraków 1997.
 14. Mańczak K.: *Technika planowania eksperymentu*. WNT Warszawa 1976.
 15. Polański Z.: *Planowanie doświadczeń w technice*. PWN, Warszawa 1984.

Summary

This article presents an outline of a method of planning an experiment known as the central composite rotatable design (CCRD) for the optimisation of processes and as an example of its application in the optimisation of parameters of a ball-cratering method. Abrasive wear tests were performed on chosen antiwear physical vapour deposition coating with the optimum work parameters of friction node.

The presented method of determining the values of the parameters has been with reference to the tested PVD gradient coating TiN/TiCN.