

Edyta OSUCH-SŁOMKA*

PROPOZYCJA METODYKI WYZNACZANIA WARTOŚCI PARAMETRÓW TESTÓW DLA METODY BALL-CRATERING

PROPOSED METHOD FOR DETERMINING THE VALUES OF TESTS FOR THE BALL-CRATERING METHOD

Słowa kluczowe:

metoda ball-cratering, powłoka wielowarstwowa, przeciwzużyciowa, metoda Taguchiego

Key words:

ball-cratering method, multilayer and anti-wear coating, Taguchi method

Streszczenie

W artykule przedstawiono propozycję metodyki wyznaczania wartości parametrów (obciążenia, prędkości obrotowej, drogi tarcia minimalnej i maksymalnej) metody ball-cratering opracowanej na potrzeby wyznaczenia współczynnika zużycia ściernego K_c oceniającego odporność badanej powłoki na ścieranie. Podstawą opracowania metodyki była metoda optymalizacji procesów Taguchiego. Opracowaną metodykę sprawdzono na przykładzie powłoki wielowarstwowej (TiN/AlCrN) $\times 5$, dla

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

której przeprowadzono serię badań odporności na zużywanie ściernie metodą ball-cratering według planu badań wynikającego z zastosowania podejścia Taguchiego. Przeprowadzone badania zużycia w przypadku powłoki wielowarstwowej w pełni potwierdziły przydatność opracowanej metodyki do wyznaczenia wartości parametrów metody ball-cratering pozwalających na efektywną i skuteczną ocenę odporności powłoki na zużywanie ściernie.

WPROWADZENIE

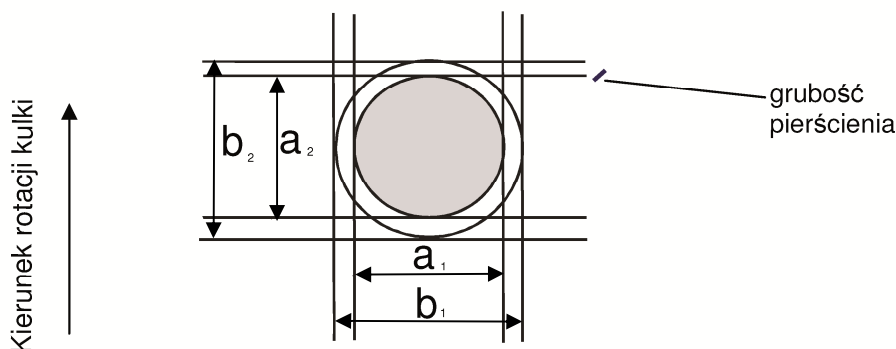
Zużywanie ściernie jest podstawowym rodzajem zużycia elementów części maszyn poruszających się względem siebie. Identyfikacja wielkości tego rodzaju zużycia a zwłaszcza możliwość jego szybkiej oceny ma zasadnicze znaczenie w praktyce badawczej. Tego typu oczekiwania spełnia metoda ball-cratering – wyznaczenia współczynnika zużywania powłok, w której dla wzmocnienia efektu destrukcji tarciowej wykorzystywane jest luźne, twarde ścierniwo, podawane do strefy tarcia. Koncepcja metody została opracowana przez międzynarodową grupę wykonawców [L. 1–4] w ramach V Programu Ramowego UE. Efektywne zastosowanie metody uzależnione jest od właściwego (dla odporności badanej powłoki) doboru wartości parametrów (obciążenie, prędkość obrotowa) pracy węzła tarcia urządzenia wykorzystywanego do wyznaczenia wielkości zużycia ściernego badanej powłoki oraz czterech dróg przebiegów testowych służących do wyznaczenia współczynnika zużywania ściernego K_c . W artykule przedstawiono propozycję metodyki wyznaczania wartości parametrów metody ball-cratering umożliwiających efektywne badanie odporności powłoki na zużywanie ściernie.

Proponowana metodyka została zastosowana do wyznaczenia wartości parametrów metody ball-cratering dla badania powłok wielowarstwowych (TiN/AlCrN)_{x5}. Badaniu poddano próbki o średnicy 25,4 mm i grubości 10 mm, wykonane ze stali WCLV (DIN X40CrMoV5-1, ASTM H13) o twardości 55 HRC. Na płytce naniesiono powłokę wielowarstwową (TiN/AlCrN)_{x5} o twardości $H = 2400 \pm 160$ HV, chropowatości $R_a = 0,20$ μm , grubości całkowitej $g = 2,25$ μm (w tym 0,16 μm dla warstwy TiN oraz 0,29 μm dla warstwy AlCrN)_{x5}. Wartość modułu Younga dla analizowanej powłoki wynosił $E = 305 \pm 12$ GPa, natomiast całkowita utrata adhezji $L_3 = 55$ N, a obłuszczenie powłoki $L_2 = 26$ N. Przeciwpróbkę stanowiła kulka łożyskowa o średnicy 25,4 mm, wykonana ze stali ŁH15 (ASTM

52100, firma Dejay Distribution Limited, Wielka Brytania) o twardości 58,6 HRC i chropowatości powierzchni $R_a = 0,177 \mu\text{m}$.

METODYKA BADAŃ

Według metody ball-cratering współczynnik zużywania ściernego wyznacza się na podstawie pomiaru średnic podłoża (a_1 , a_2 – średnice wewnętrzne) oraz średnic powłoki (b_1 , b_2 – średnice zewnętrzne) wyznaczonych przy stałych wartościach obciążenia i prędkości obrotowej dla czterech różnych dróg (**Rys. 1**). W metodzie ślady zużycia wykorzystywane do oceny odporności powłoki powinny mieć błąd względny średnic (obliczony jako stosunek odchyłki średnicy d_1 lub d_2 ($d = a, b$) od wartości średniej w stosunku do średniej średnic) mniejszy od 10%.



Rys. 1. Pomiar średnic śladu zużycia

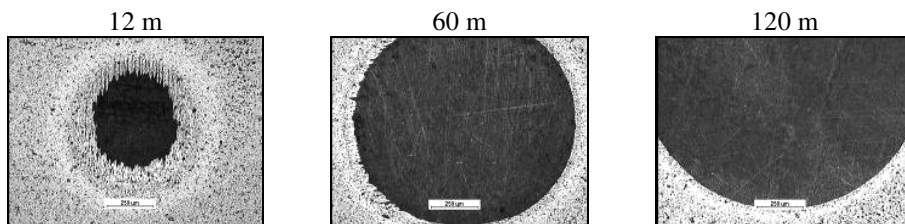
Fig. 1. Measurement of crater with perforation of coating

W proponowanej metodzie wyznaczenia wartości parametrów pracy węzła zapewniających skuteczne i efektywne zastosowanie metody ball-cratering do badanej powłoki zastosowano metodę optymalizacji procesów Taguchiego [**L. 5**]. Optymalizacja miała na celu dobór parametrów metody minimalizujących błędy względne średnic kraterów śladów zużycia oraz maksymalizację grubości pierścienia śladu liczonego jako różnica pomiędzy średnicą zewnętrzną i wewnętrzną krateru śladu.

Punktem wyjścia prezentowanej metodyki jest wyznaczenie obszaru wartości dopuszczalnych parametrów metody ball-cratering, w którym będą poszukiwane wartości optymalne ze względu na minimalizację różnic średnic kraterów śladów zużycia i maksymalizację grubości pierścienia. Wartości obciążenia (0,2; 0,4 i 0,6 N) i prędkości obrotowej (38, 80

i 150 obr./min) przyjęto na podstawie normy [L. 6] oraz przeprowadzonych badań własnych [L. 7, 8]. W przypadku czterech dróg badawczych, w celu zmniejszenia liczby zmiennych w badaniach optymalizacyjnych ograniczono się do wyznaczenia wartości tylko drogi pierwszej (s_{\min}) i czwartej (s_{\max}). Drogi druga s_2 i trzecia s_3 są obliczone tak, aby przyrosty wartości kolejnych dróg były zbliżone, tzn. jeżeli $\sigma = (s_{\max} - s_{\min})/3$, to $s_2 = s_{\min} + \sigma$ i $s_2 = s_{\max} - \sigma$. Zatem w dalszym ciągu należało się skupić na wyznaczeniu obszaru dopuszczalnego tylko dróg minimalnej i maksymalnej. Dalej, w celu zbadania wpływu wielkości tych dróg na wielkość błędu względnego średnic kraterów na podstawie badań własnych oraz analizy literatury przyjęto średnią prędkość obrotową (80 obr./min) i średnie obciążenie (0,4 N) oraz trzy długości dróg: 12 m, 60 m i 120 m.

Dla tak wyznaczonych wartości parametrów na pierwszym etapie badań wykonano badania zużyciowe powtarzając czterokrotnie każdy przebieg badawczy dla kolejnych długości dróg. Przykładowe zdjęcia otrzymanych śladów zużycia po przeprowadzonych testach tribologicznych przedstawiono na **Rys. 2**.

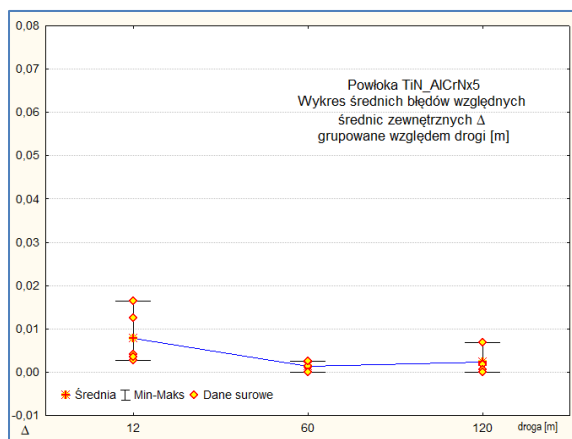


Rys. 2. Obrazy śladów zużycia wykonane na mikroskopie optycznym dla powłoki (TiN/AlCrN)x5

Fig. 2. Optical images of the craters produced on the (TiN/AlCrN)x5 coating

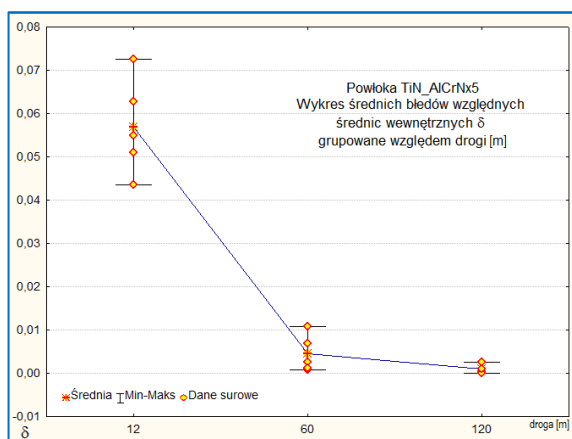
Natomiast na **Rys. 3** i **4** pokazano wykresy błędów względnych dla średnicy zewnętrznej i wewnętrznej.

Dla wszystkich badanych dróg analiza wykresu błędów względnych średnicy zewnętrznej wskazuje nie tylko na ich małą wartość (poza dwoma przypadkami mniejszą niż 1%), ale także na ich mały rozrzut, co umożliwiło włączenie wszystkich badanych dróg do obszaru dopuszczalnego. Natomiast analiza błędów względnych średnic wewnętrznych wykazała istotny wzrost błędu dla drogi 12 m, dla której wszystkie błędy względne są 5-krotnie większe od 0,01 (**Rys. 3, 4**), który to poziom przyjęto jako poziom dopuszczalny.



Rys. 3. Wykres błędów względnych średnic zewnętrznych

Fig. 3. Chart of relative errors of the outer diameter



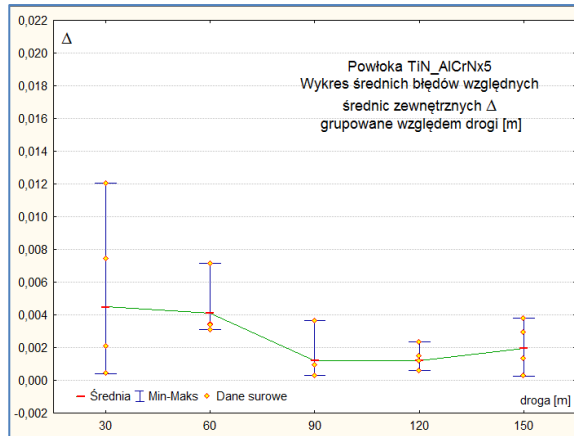
Rys. 4. Wykres błędów względnych średnic wewnętrznych

Fig. 4. Chart of relative errors of the inner diameter

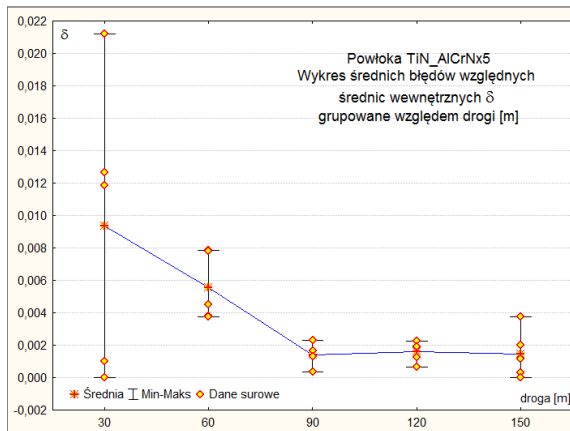
W związku z powyższym do dalszych badań wytypowano przedział wartości dróg 60–120 m, który rozszerzono o drogi 30 i 150 m oraz wartość 90 m pozwalającą na dokładniejsze zbadanie zmienności błędu względnego w przedziale 60–120 m (**Rys. 5 i 6**).

Na podstawie analizy błędów względnych, zwłaszcza średnicy wewnętrznej, jako zbiór wartości dopuszczalnych ze względu na wielkość

błądu jak i jego rozrzut do dalszych rozważań, przyjęto drogi 90 m, 120 m i 150 m (**Rys. 5, 6**).

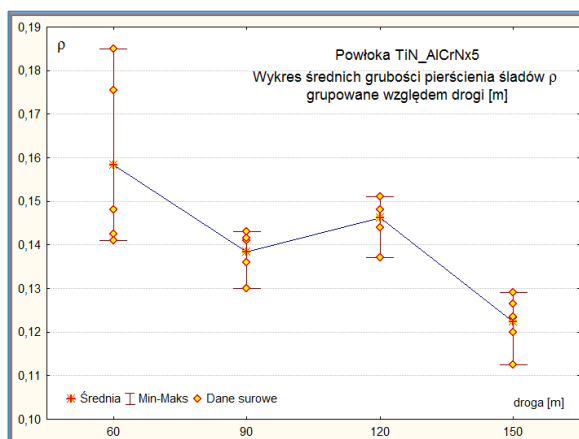


Rys. 5. Wykres błędów względnych średnic zewnętrznych
Fig. 5. Chart of relative errors of the outer diameters



Rys. 6. Wykres błędów względnych średnic wewnętrznych
Fig. 6. Chart of relative errors of the inner diameter

W celu weryfikacji przydatności wybranych dróg do wyznaczenia wielkości zużycia obliczono grubość pierścienia śladu. Wykres zmienności grubości pierścienia w zależności od długości drogi przedstawiono na **Rys. 7**.



Rys. 7. Wykres grubości pierścienia śladu

Fig. 7. Chart of ring thickness of the wear scar

Jak widać na wykresie, grubość pierścienia maleje ze wzrostem długości drogi, zmienia się także rozrzut wyników. Efektywność badań wymaga takiego doboru dróg, aby grubość pierścienia była ustabilizowana i odpowiednio duża. Bowiem zbyt cienki pierścień sprzyja zwiększeniu błędów odczytu mierzonych wartości średnic.

Podsumowując powyższe rozważania, do dalszych badań wybrano drogi 90 i 150 m. W celu ostatecznego wyboru optymalnych parametrów wykorzystano metodę optymalizacji Taguchiego. Zastosowano plan L9 – układ 9 eksperymentów umożliwiający optymalizację wpływu 4 zmiennych przyjmujących po trzy możliwe wartości ze względu na przyjęte kryterium. Zestawy wartości parametrów metody ball-cratering tworzące układ 9 eksperymentów wyznaczone na podstawie podejścia Taguchiego popazano w **Tabeli 1**.

Na III etapie badań każdy układ eksperymentów powtórzono cztery razy. Na podstawie uzyskanych wyników wyznaczono wartości funkcji kryterium Eta^1 , według której można wyznaczyć parametry metody ball-cratering minimalizujące² błędy względne średnic uzyskanych śladów (**Rys. 8**).

¹ Funkcji kryterium $\text{Eta} = -10 \cdot \log_{10}((\text{Sum}(y^2)/N))$, gdzie y oznacza sumowane błędy względne.

² Konstrukcja funkcji gwarantuje uzyskanie wartości maksymalnej dla najmniejszych błędów.

Tabela 1. Parametry eksperymentu przygotowanego według metody Taguchi

Table 1. Test conditions for the coating based on the Taguchi method

| Nr próby | Parametry eksperymentu dla powłoki AlTiN/ podłoże azotowane | | | | | |
|----------|---|------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | Obciążenie [N] | Prędkość obrotowa [obr./min] | Droga 1 [m] | Droga 2 [m] | Droga 3 [m] | Droga 4 [m] |
| 1 | 0,2 | 38 | 75 | 95 | 115 | 135 |
| 2 | 0,2 | 80 | 90 | 110 | 130 | 150 |
| 3 | 0,2 | 150 | 105 | 125 | 145 | 165 |
| 4 | 0,4 | 150 | 75 | 100 | 125 | 150 |
| 5 | 0,4 | 38 | 90 | 115 | 140 | 165 |
| 6 | 0,4 | 80 | 105 | 115 | 125 | 135 |
| 7 | 0,6 | 80 | 75 | 105 | 135 | 165 |
| 8 | 0,6 | 150 | 90 | 105 | 120 | 135 |
| 9 | 0,6 | 38 | 105 | 120 | 135 | 150 |

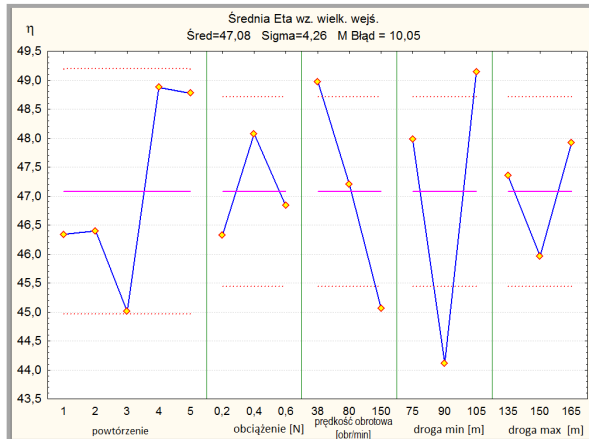
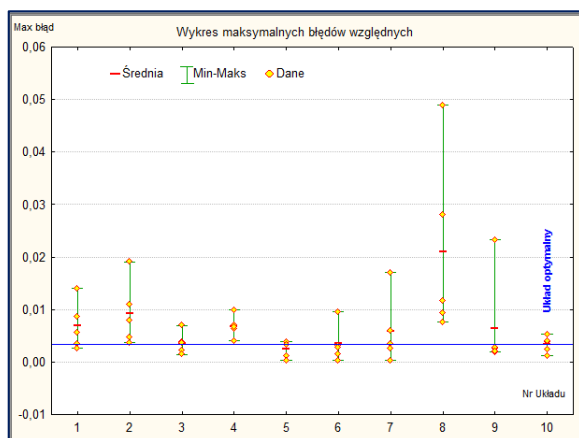
**Rys. 8. Wykres funkcji Eta dla kryterium „im mniejsze, tym lepiej”**

Fig. 8. Chart of function Eta for the criterion “the smaller – the better”

Na podstawie analizy wykresu funkcji Eta można przyjąć, że najmniejsze błędy względne średnic kraterów śladów zużycia uzyskanych według metody ball-cratering dla powłoki (TiN/AlCrN)_{x5} otrzymane zostaną dla: obciążenia 0,4 N, prędkości obrotowej 38 obr./min, przy drogach minimalnej 105 m i maksymalnej 165 m.

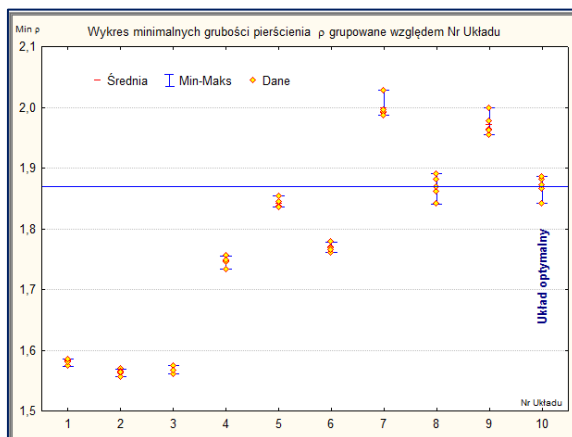
W celu weryfikacji uzyskanych wyników przeprowadzono eksperyment weryfikacyjny, badając pięciokrotnie ww. powłokę według wyznaczonych parametrów optymalnych. Wykres przedstawiony na **Rys. 9** pokazuje wartości maksymalnych błędów względnych średnic zewnętrznej i wewnętrznej uzyskanych w badaniach optymalizacyjnych (układy 1–9) oraz w badaniu weryfikacyjnym (układ 10).

Analizując wykres na **Rys. 9**, zauważyć można, że tylko w układzie 5 uzyskano mniejszą wartość błędów względnych niż w układzie optymalnym. Ponadto błędy względne dla wyznaczonych parametrów charakteryzują się małym rozrzutem oraz przyjmują wartości istotnie mniejsze od wielkości 0,01.



Rys. 9. Wartości maksymalnych błędów względnych w eksperymentach: optymalizacyjnym i weryfikacyjnym metodą ball-cratering dla powłoki (TiN/AlCrN)x5

Fig. 9. The values of relative errors in the optimization and verification experiments using ball-cratering method for the (TiN/AlCrN)x5 coating



Rys. 10. Rozkład grubości pierścienia śladów zużycia w eksperymentach: optymalizacyjnym i weryfikacyjnym metodą ball-cratering dla powłoki (TiN/AlCrN)x5

Fig. 10. The distribution of ring thickness of the wear scars in the experiments: optimization and verification for ball-cratering method

Należy pamiętać, że ostatecznym kryterium weryfikacyjnym wyznaczenia wartości parametrów metody ball-cratering jest otrzymanie regularnych kraterów śladów zużycia, co zostało potwierdzone w ramach eksperymentu weryfikacyjnego (**Rys. 10**).

Na podstawie wyników pomiarów średnic kraterów zużycia z układu eksperymentu przeprowadzonego przy wartościach parametrów metody wyznaczonych na podstawie prezentowanej metodyki obliczono dla powłoki (TiN/AlCrN)x5 współczynnik zużywania $K_c = 5,5 [10^{-13} \text{ m}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}]$.

PODSUMOWANIE

Przedstawiona w pracy trzyetapowa metodyka doboru wartości parametrów metody ball-cratering umożliwia wyznaczenie warunków pracy węzła testowego dającego regularne ślady kraterów, na podstawie których wyznacza się wartość współczynnika zużywania badanej powłoki. Przedstawiona metodyka została zastosowana dla powłoki wielowarstwowej (TiN/AlCrN)x5. Uzyskane wartości parametrów umożliwiły w efektywny i skuteczny sposób wyznaczenie wartości współczynnika zużywania K_c , co można uznać za pozytywną weryfikację zaproponowanej metodyki.

LITERATURA

1. Gee M.G., Gant A., Hutchings I., Bethke R., Schiffman K., Van Acker K., Poulat S., Gachoń Y., Von Stebut J.: Progress towards standardisation of ball-cratering. *Wear*. 2003; 255: 1–13.
2. Gee M.G., Gant A.J., Hutchings I.M., Kusano Y., Bethke R., Schiffman K., Van Acker K., Poulat S., Gachoń Y., Von Stebut J., Hatto P., Plint G.: Results from an interlaboratory exercise to validate the micro-scale abrasion test. *Wear*. 2005; 259: 27–35.
3. Gee M.G., Wicks M.J.: Ball crater testing for the measurement of the unlubricated sliding wear of wear-resistant coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2000; 133–134:376–382.
4. Gee M.G.: The use of PC scanners in micro-abrasion wear testing. *Wear*. 2005; 259:1448–1452.
5. Ruta R.: Zastosowanie metody Taguchiego do planowania eksperymentów w badaniach tribologicznych. *TRIBOLOGIA*. 2011; 236: 125–141.
6. Norma PN-EN 1071-6:2008 Techniczna ceramika zaawansowana. Metody badania powłok ceramicznych. Część 6: Oznaczanie odporności na ścieranie powłok metodą mikrościerania.

7. Osuch-Słomka E., Słomka Z., Szczerek M.: Określanie intensywności zużycia powłok niskotarciowych metodą ball-cratering. TRIBOLOGIA. 2009; 224:127–137.
8. Sprawozdanie z działalności statutowej: Badania mechanizmów zacierania i powierzchniowego zużycia zmęczeniowego elementów smarowych. Radom, ITeE – PIB 2009.

Recenzent:
Jan WALKOWICZ

Summary

The presented three-stage method of test parameter selection for the ball-cratering method allows one to determine the working conditions leading to wear scars with highly regular shape.

Based on aforementioned regular wear scars, it is possible to determine the coefficient of specimen abrasive wear. The presented method has been applied to the multilayer coating (TiN/AlCrN)_{x5}. The selected test parameters allowed, in an effective and efficient manner, to calculate the K_c wear coefficient, which is a positive verification of the proposed method.