

Magdalena TRZOS*

ANALIZA WPLYWU URZĄDZENIA BADAWCZEGO NA WYZNACZENIE WSPÓŁCZYNNIKA TARCIA

THE ANALYSIS OF TRIBOTESTER INFLUENCE ON FRICTION COEFFICIENT ESTIMATION

Słowa kluczowe:

powtarzalność wyników badań, współczynnik tarcia, metoda badawcza, parametry procesu tarcia, tribotester

Key words:

research results reproducibility, friction coefficient, research method, friction process parameters, tribotester

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów współczynnika tarcia przeprowadzone z wykorzystaniem różnych urządzeń badawczych. W badaniach uwzględniono różne pary skojarzeń materiałowych. Doświadczenia przeprowadzono na urządzeniu T10 z pionowym (T10V) oraz poziomym

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

(T10H) ustawieniem osi obrotu próbki i urządzenia T11 z pionowym usytuowaniem osi. Eksperyment badawczy zaplanowano zgodnie z metodą Taguchiego w celu wyznaczenia parametrów procesu pozwalających na minimalizację rozrzutu wyników pomiaru. Przedstawione w artykule analizy dotyczą identyfikacji wpływu urządzenia badawczego na wyznaczenie współczynnika tarcia suchego w różnych warunkach prowadzenia procesu. Na podstawie uzyskanych wyników dokonano również oceny wpływu parametrów procesu wilgotności, obciążenia i prędkości na wyniki pomiaru współczynnika tarcia trzech różnych skojarzeń materiałowych badanych na analizowanych urządzeniach badawczych.

WPROWADZENIE

W rozwiązywaniu problemów tribologicznych, głównie ze względu na znaczne zróżnicowanie i złożoność problematyki i towarzyszące temu trudności w uzyskaniu rozwiązań teoretycznych wciąż najważniejszą metodę w zdobywaniu informacji na temat zachowania się obiektów w konkretnych uwarunkowaniach procesu tarcia stanowi eksperyment tribologiczny. Różnorodność analizowanych sytuacji tribologicznych spowodowała rozwój wielu metod badawczych, a konsekwencji urządzeń przeznaczonych do wywołania określonej, analizowanej sytuacji tribologicznej. Analiza wyników badań tribologicznych wskazuje na duże zróżnicowanie uzyskiwanych rezultatów charakteryzujących te same właściwości badanego obiektu tribologicznego, obserwowane są również duże różnice rozrzutów wyników.

Podjęmowane są międzynarodowe inicjatywy, wśród których najważniejszą jest *Versailles Program on Advanced Materials and Standards VAMAS*, zmierzające do wypracowania wytycznych i standardów w celu uzyskanie między innymi poprawy powtarzalności wyników badań tarcia i zużycia. Jednak sytuacja jest wciąż daleka od zadowalającej i wynika głównie z tego, że właściwości tribologiczne nie są cechą właściwą dla jednego materiału, lecz skojarzenia materiałów tworzących parę trącą i silnie zależą od konfiguracji i parametrów pracy węzła tarcia oraz parametrów otoczenia. Produkty zużycia znajdujące się w strefie tarcia mogą oddziaływać na proces tarcia w przypadkowy, a więc nieprzewidywalny sposób.

Analizy przeprowadzone w ramach projektu VAMAS [L. 1, 3, 4] wykazały, że powtarzalność wyników badań przeprowadzonych w te-

stach kulka–dysk zależy od skojarzenia materiałowego i była dobra dla skojarzeń stal–stal i stal–powłoka (TiN), natomiast zła dla skojarzenia powłoka–powłoka.

W badaniach tribologicznych filmu MoS₂ Suzuki [L. 6] wykazał różnice wyznaczenia współczynnika tarcia w testach z różną konfiguracją węzła, większe wartości współczynnika tarcia uzyskiwano przy badaniach dysk–dysk (toczenie/poślizg) niż w testach kula–dysk (poślizg).

Badania skojarzenia stal–powłoka (węgiel boru) [L. 8] wykazały dużą zależność właściwości tribologicznych od wilgotności. Dobrą powtarzalność współczynnika, mniejszą wartość oraz jej stabilność (odchylenie od wartości średniej mniejsze niż 15%) uzyskano w warunkach średniej i wysokiej wilgotności, podczas gdy przy małej wilgotności obserwowano duże różnice.

Badania [L. 9] wpływu chropowatości na niestabilność tarcia ślizgowego wykazały, że można zmniejszyć zmienność wartości w pomiarach współczynnika tarcia poprzez zwiększenie powierzchni nominalnej.

OPIS EKSPERYMENTU

Analizie poddano wyniki badań współczynnika tarcia [L. 14] przeprowadzone w ITeE – PIB na urządzeniach tribologicznych T10 z węzłem kulka – pierścień oraz T11 z węzłem kulka–dysk. Eksperyment prowadzono w warunkach tarcia suchego.

Testery tribologiczne T10 i T11 wykorzystywane są do badania podstawowych właściwości tribologicznych materiałów, umożliwiając wyznaczenie średniego współczynnika tarcia węzła oraz zbadanie intensywności zużywania powierzchni trących. Dokładniej urządzenie T10 przeznaczone jest do oceny właściwości tribologicznych nowoczesnych materiałów używanych na ślizgowe elementy maszyn, przede wszystkim cienkich powłok. Za pomocą urządzenia T10 można precyzyjnie zbadać odporność na zużycie i współczynnik tarcia dowolnego skojarzenia materiałowego pracującego w ruchu ślizgowym, w zależności od prędkości poślizgu, nacisków powierzchniowych i innych czynników. Urządzenie T10 może pracować w ustawieniu pionowym (oznaczenie T10V) bądź w ustawieniu poziomym (T10H) osi próbki i kierunku obciążenia.

Urządzenie T11 przeznaczone jest między innymi do oceny właściwości tribologicznych materiałów używanych na ślizgowe elementy maszyn. Za jego pomocą może być zbadana odporność na zużycie i współ-

czynnik tarcia dowolnego skojarzenia materiałowego pracującego w ruchu ślizgowym, prędkości poślizgu, nacisków powierzchniowych, rodzaju gazu w komorze testowej i innych czynników. Pracuje ono w ustawieniu pionowym osi próbki i kierunku obciążenia, co zaznaczono jako T11V.



Rys. 1. Ustawienie węzła tarcia w testerach T10 i T11

Fig. 1. Position of friction couple in T10 and T11 tribotesters

Tabela 1. Poziomy i wartości parametrów uwzględnione w badaniach

Table 1. The research processes parameters levels and values

Poziom	Materiał skojarzenia (M)	Parametr procesu		
		Wilgotność (H) [%]	Obciążenie (P) [N]	Prędkość (v) [m/s]
1	stal* (dysk) – stal* (kula) (S/S)	35	5	0,1
2	steel* (dysk) – ceramika** (kula) (S/C)	50	10	0,2
3	powłoka*** (dysk) – cerami- ka** (kula) (P/C)	80	15	0,3

*AISI 52100, ** Al₂O₃, ***CrN

Badania zostały zaplanowane dla trzech różnych skojarzeń materiałowych przy różnych wartościach parametrów procesu: obciążenia, prędkości i wilgotności. Wyznaczano współczynniki tarcia z pięciu powtórzeń każdego procesu przy wartościach parametru, dla których założono trzy poziomy wartości, jak w **Tabeli 1**.

W celu porównania wyników z różnych urządzeń badawczych wszystkie procesy tarcia z tymi samymi kombinacjami parametrów zostały powtórzone na testerach T10V, T10H i T11V na drodze tarcia wynoszącej 1000 m.

Przy tych założeniach w pełnym eksperymencie badawczym należało by przeprowadzić 243 procesy, co związane jest zarówno z dużymi kosztami, jak również potrzebnym znacznym czasem na przeprowadzenie eksperymentu. Dlatego też w planowaniu eksperymentu wykorzystano podejście Taguchiego do wyznaczenia zestawu wartości parametrów.

Metoda Taguchiego wykorzystuje tzw. tablice ortogonalne, dzięki czemu przy znacznym zmniejszeniu liczby eksperymentów uzyskuje się informacje o wpływie poszczególnych parametrów na funkcję kryterium. Zgodnie z tą metodą wyznaczono dziewięć procesów tarcia według tablicy ortogonalnej L9. Poziomy wartości parametrów oraz wartości współczynników tarcia uzyskane w eksperymencie dla każdego z testów przedstawiono w **Tabeli 2**.

Tabela 2. Poziomy wartości parametrów w poszczególnych testach eksperymentu oraz uzyskane współczynniki tarcia

Table 2. The value of parameters in tests of experiments and values of friction coefficient achieved

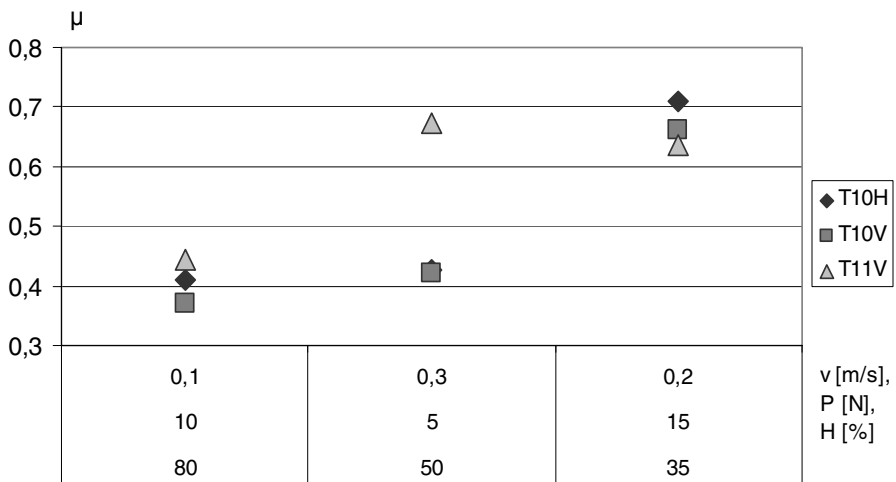
Test nr.	Poziom wartości parametru procesu				Wyznaczona wartość średnia współczynnika tarcia		
	M	H	P	v	T10H	T10V	T11V
1	1	1	1	1	0,5246	0,4578	0,5682
2	1	2	2	2	0,5318	0,4996	0,4310
3	1	3	3	3	0,4238	0,4216	0,3754
4	2	1	2	3	0,7864	0,7898	0,7008
5	2	2	3	1	0,6606	0,7786	0,8394
6	2	3	1	2	0,4758	0,5660	0,5130
7	3	1	3	2	0,7092	0,6604	0,6372
8	3	2	1	3	0,4264	0,4206	0,6740
9	3	3	2	1	0,4096	0,3704	0,4448

Każdy z procesów tarcia przedstawionych w **Tab. 1** powtórzono na każdym z tribotesterów w seriach po pięć doświadczeń, wyznaczając wartość średnią współczynnika tarcia.

ANALIZA WYNIKÓW EKSPERYMENTU

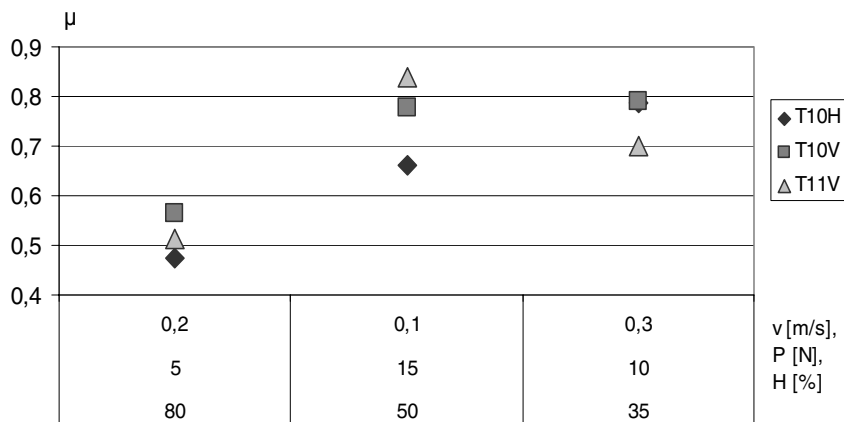
W celu zbadania wpływu parametrów procesu oraz charakterystyk materiałowych na rozrzut wyników przeprowadzono szczegółową analizę wyników eksperymentu tribologicznego.

Uzyskane wyniki wskazują na pewne różnice w wyznaczeniu średniej wartości współczynnika tarcia na różnych urządzeniach badawczych przy tych samych parametrach procesu. Na **Rys. 2–4** przedstawiono różnice w wyznaczeniu współczynnika tarcia na analizowanych urządzeniach badawczych przy różnych wartościach wilgotności.



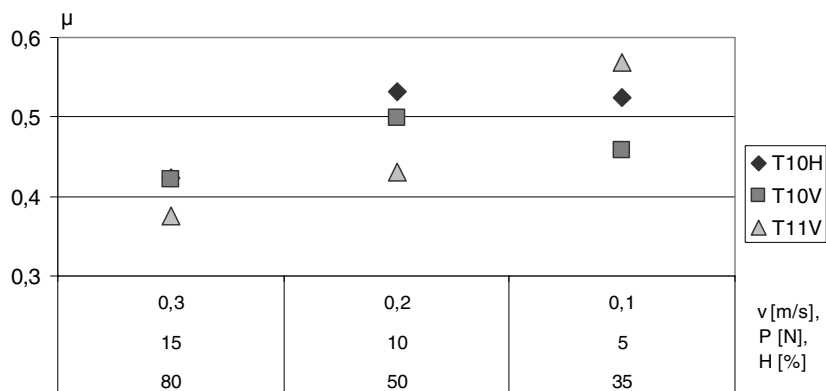
Rys. 2. Średnie wartości współczynnika tarcia wyznaczone dla skojarzenia P/C w różnych warunkach tarcia

Fig. 2. The average values of friction coefficient measured for couple material P/C (coated steel/ ceramic) in different condition of friction process



Rys. 3. Średnie wartości współczynnika tarcia wyznaczone dla skojarzenia S/C w różnych warunkach tarcia

Fig. 3. The average values of friction coefficient measured for couple material S/C (steel/ ceramic) in different condition of friction process



Rys. 4. Średnie wartości współczynnika tarcia wyznaczone dla skojarzenia S/S w różnych warunkach tarcia

Fig. 4. The average values of friction coefficient measured for couple material S/S (steel/steel) in different condition of friction process

Z przedstawionych wyników widać, że wartość średnia współczynnika tarcia wyznaczona na różnych urządzeniach największe różnice wykazuje przy wilgotności 50%. Różnica ta sięga blisko 0,3 w przypadku współczynnika tarcia skojarzenia P/C wyznaczonego z badań na urządze-

niu T11V i T10H. Z przebiegu zmian wartości współczynnika tarcia w zależności od wilgotności można przypuszczać o błędzie w wyznaczonej średniej wartości współczynnika na urządzeniu T11V dla skojarzeń P/C przy wilgotności 50%, gdzie pomimo zbliżonych wartości średnich współczynnika tarcia wyznaczonych na różnych urządzeniach przy wilgotności 35% oraz 80% (różnice mniejsze od 0,1), przy wilgotności 50% różnice pomiaru na T11V i pozostałych urządzeniach sięgają wartości 0,3. Jednak podobną sytuację zanotowano w przypadku pozostałych zbadanych skojarzeń materiałowych.

Szczegółowa analiza rozrzutów wyników badań, w seriach pięciu pomiarów, pokazała znaczącą wartość rozrzutu wyników na urządzeniu T10H w warunkach wilgotności 50%, wartość ta dla skojarzenia S/C sięgnęła nawet 40% wyznaczonej średniej wartości współczynnika tarcia oraz 30% dla pozostałych skojarzeń. W przypadku urządzenia T11V wartość rozrzutu wyników w tych samych warunkach badań (wilgotność 50%) wyniosła odpowiednio dla skojarzenie S/C – 5%, dla skojarzenia S/S niewiele ponad 10%, a dla P/C prawie 30% wartości zmierzonego współczynnika tarcia. Najmniejszy rozrzut uzyskano dla pomiarów wykonanych na urządzeniu T10V dla skojarzeń S/S i S/C po 5%, a dla P/C – 20% w odniesieniu do wartości średniej wyznaczonego współczynnika tarcia.

Analogiczne rozważania przeprowadzone na bazie wyników uzyskanych przy wartościach wilgotności 35% i 80% pokazały znacznie mniejsze różnice w wyznaczeniu współczynnika tarcia na różnych urządzeniach badawczych. Najlepsze rezultaty w pomiarze współczynnika tarcia przy wilgotności 35%, ze względu na rozrzut wyników, uzyskano dla skojarzenia S/S i P/C na urządzeniu T10H, a dla skojarzenia S/C na urządzeniu T10V. Urządzenie T10V również w pomiarach przy wilgotności 80% dało najmniejsze w porównaniu z pozostałymi rozrzuty wyników pomiaru.

Przeprowadzone analizy różnic w pomiarach współczynnika tarcia na różnych urządzeniach w zależności od zadanego obciążenia wskazały mniejsze, w stosunku do wilgotności, zróżnicowanie w wyznaczeniu średniej wartości współczynnika tarcia.

Średnie wartości współczynnika tarcia wyznaczone przy tych samych wartościach obciążenie na różnych urządzeniach badawczych różnią się o od 0,003 między wartościami wyznaczonymi na urządzeniach T11V

i T10V przy obciążeniu 15 N, do 0,11 między wartościami wyznaczonymi na urządzeniach T10H i T11V przy obciążeniu 5 N.

Z otrzymanych rezultatów wynika, że w zależności od skojarzenia materiałowego, różny jest wpływ obciążenia na różnice w pomiarach współczynnika tarcia na różnych urządzeniach. Dla skojarzenia stal–stal najmniejszy błąd względny – poniżej 5% (odniesiony do wartości średniej μ) uzyskano przy pomiarze na urządzeniu T10V przy obciążeniu 15 N. Przy tym obciążeniu minimalna jest również różnica (do 0,046) w wyznaczeniu wartości średnich współczynnika tarcia stal–stal na różnych urządzeniach.

W przypadku skojarzenia stal–ceramika przy obciążeniu 15 N w pomiarach na urządzeniu T10V i T11V wystąpiła minimalna (bliska zero) różnica w wyznaczeniu współczynnika tarcia, jednak mniejsze rozrzuty wyników zanotowano przy obciążeniu 10 N, również w tym przypadku różnica w wyznaczonym współczynniku tarcia była niewielka (0,02). Natomiast różnice z wartością współczynnika tarcia wyznaczoną na T10H sięgają powyżej 0,12 przy dużym rozrzucie wyników badań na tym testerze (ponad 0,25 przy obciążeniu 10 N).

W przypadku badania skojarzenia powłoka–ceramika różnica w wyznaczeniu współczynnika tarcia przy 15 N na T10H oraz T11V wynosi 0,075, a na T10H oraz T10V – 0,05. Najmniej (0,003) różnią się, przy tym obciążeniu, wyniki pomiaru na T10V i T11V.

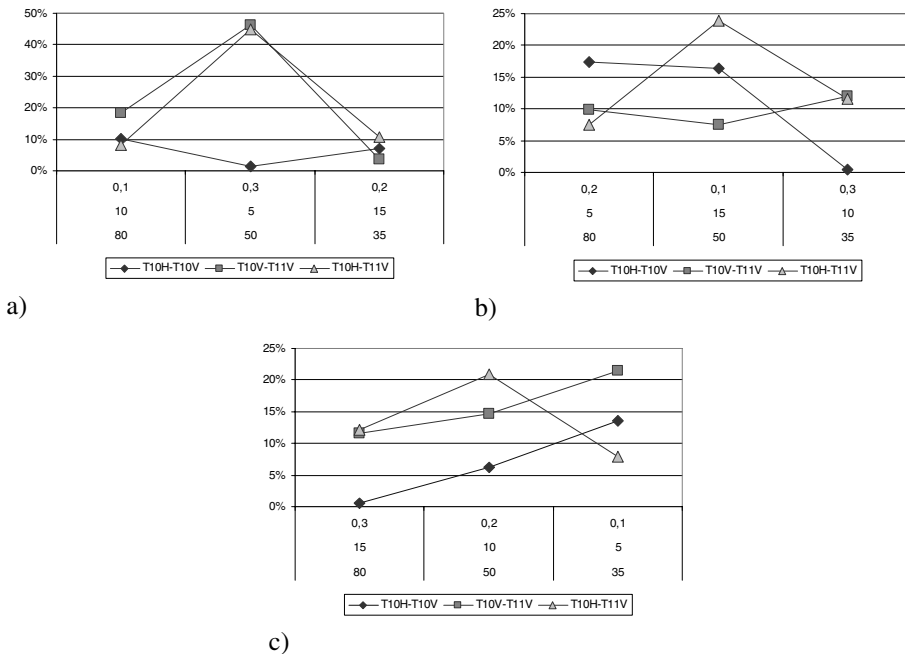
Przeprowadzone badania pokazują, że różnice w wyznaczeniu współczynnika tarcia w zależności od prędkości są niewielkie.

Średnie wartości współczynnika tarcia wyznaczone przy tych samych wartościach prędkości tarcia na różnych urządzeniach badawczych różnią się o od 0,002 między wartościami wyznaczonymi na urządzeniach T10H i T10V przy prędkości 0,3 m/s, do 0,085 między wartościami wyznaczonymi na urządzeniach T10H i T11V przy prędkości 0,1 m/s.

Analiza wariancji przeprowadzona pod kątem wpływu analizowanych parametrów procesu, urządzenia badawczego i skojarzenia materiałowego na rozrzut wyników pomiaru wskazała, że tylko urządzenie ma istotny statystycznie (na poziomie 0,036) wpływ na funkcję kryterium opisującą sumę bezwzględnych różnic między wynikami eksperymentu w ustalonych warunkach procesu tarcia. Przeprowadzone analizy wyników eksperymentu wskazują na najlepszą powtarzalność wyników badań na tribotesterze T10V. Można również zaobserwować taką samą tendencję zmian (**Rys. 2–4**), wraz ze zmianą wilgotności, współczynnika tarcia

wyznaczonego na tym urządzeniu z tendencją zmian na T10H, jednak w tym przypadku zanotowano większe rozrzuty pomiarów. Na tej podstawie można wytypować urządzenie T10V do pomiaru współczynnika tarcia wszystkich przeanalizowanych skojarzeń materiałowych.

W celu oszacowania porównywalności wyników pomiarów dokonanych na różnych tribotesterach przeanalizowano różnice w pomiarach współczynnika tarcia na różnych urządzeniach odniesione do wartości średnich z pomiarów na tych urządzeniach (**Rys. 5a–5c**).



Rys. 5. Różnice wyznaczenia współczynnika tarcia na urządzeniach badawczych odniesione do wartości średniej z pomiarów na tych urządzeniach w różnych warunkach procesu tarcia dla skojarzeń materiałowych: a) P/C, b) S/C, c) S/S

Fig. 5. The ratio of difference of friction coefficient estimated with the use of different tribotester to average value of that coefficient for friction couple materials: a) P/C, b) S/C, c) S/S

W większości analizowanych przypadków różnica z pomiarów współczynnika tarcia na dwóch testerach nie przekracza 20% wartości średniej. Najbardziej w stosunku do wartości średniej różniły się wyniki pomiarów przeprowadzonych w warunkach wilgotności 50%, które

w przypadku skojarzenia P/C wyniosły ponad 40% wartości średnich z pomiarów na testerze T11V i odpowiednio T10H i T10V.

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania wykazały występowanie pewnych różnic w pomiarach współczynnika tarcia na różnych urządzeniach badawczych przeprowadzonych w tych samych warunkach. Na podstawie uzyskanych wyników można wnioskować, że porównanie wyników badań na analizowanych testerach może być dokonane z błędem nieprzekraczającym 20% przy odpowiednim doborze parametrów procesu. Przeprowadzone analizy rozrzutów wykazały najlepszą powtarzalność wyników na tribotesterze T10V, praktycznie dla wszystkich zbadanych skojarzeń materiałowych, wykazały również brak istotności statystycznej wpływu parametrów procesu na rozrzut wyników pomiaru.

Zestawy parametrów procesu w przeprowadzonych badaniach wykazały natomiast wpływ na wartość współczynnika tarcia skojarzeń materiałowych. W przypadku wszystkich zbadanych skojarzeń materiałowych zaobserwowano tendencję malejącą wyznaczonego współczynnika tarcia wraz ze wzrostem wilgotności. Analiza wariancji funkcji kryterium rozpatrywanej ze względu na minimalną wartość współczynnika tarcia wykazała silną istotność statystyczną wilgotności. Na tym etapie analiz zagadnienia powtarzalności i porównywalności wyników badań tribologicznych nie stwierdzono natomiast wyraźnej zależności wyznaczenia wartości współczynnika tarcia badanych skojarzeń materiałowych od pozostałych parametrów procesu (obciążenia i prędkości), nieistotny statystycznie jest również wpływ urządzenia badawczego.

LITERATURA

1. Santner E.: Comparison of wear and friction measurements of TiN coatings. *Tribologia* 1/95, s. 7–29.
2. Ludema K.C.: Friction, wear, and lubrication – a textbook in tribology. Boca Raton (Florida): CRC Press, 1996.
3. Czichos H., Becker S., Lexow J.: Multilaboratory tribotesting: results from the Versailles Advanced Materials and Standards Programme on Wear Test Methods. *Wear* 114 (1987), 109–130.
4. Czichos H., Becker S., Lexow J.: International multilaboratory sliding wear tests with ceramics and steel. *Wear* 135 (1989), 171–191.

5. Zhao H., Barber G.C., Liu J., Friction and wear in high speed sliding with and without electrical current, *Wear* 249 (2001), 409–414.
6. Suzuki M.: Comparison of tribological characteristics of sputtered MoS₂ films coated with different apparatus. *Wear* 218 (1998), 110–118.
7. Huq M.Z., Celis J.P.: Reproducibility of friction and wear results in ball-on-disc unidirectional sliding tests of TiN-alumina pairings. *Wear* 212 (1997), 151–159.
8. Cuong P.D., Ahn H.-S., Yoon E.-S., Shin K.-H.: Effects of relative humidity on tribological properties of boron carbide coating against steel. *Surface & Coatings Technology* 201 (2006), 4230–4235.
9. Zhai H., Huang Z.: Instabilities of sliding friction governed by asperity interference mechanisms. *Wear* 257 (2004), 414–422.
10. Castro W., Weller D.E., Cheenkachorn K., Perez J.M.: The effect of chemical structure of basefluids on antiwear effectiveness of additives. *Tribology International* 38 (2005), 321–326.
11. Trzos M., Piekoszewski W., Ruta R.: The number of research courses influence on the estimation of friction contact fatigue durability scatter of lubricated rolling contacts. *Tribologia* 2/2010 (230) (in Polish).
12. Yang W.H., Tarng Y.S.: Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method. *J. Mater. Process Technol.* 84(1998):122–129
13. Sahoo P., Pal S.K.: Tribological Performance Optimization of Electroless Ni–P Coatings Using the Taguchi Method and Grey Relational Analysis. *Tribol Lett* (2007) 28:191–201.
14. Maldonado D.: Influence of test parameters on the coefficient of friction. *Tribologia* nr 6/2008(222), 83–92.

Recenzent:
Wiesław LESZEK

Summary

The article presents the research results of friction coefficient measurements with the use of different tribotesters. Different friction couples materials were investigated. The experiments were carried out on tester T10 with a vertical (T10V) and horizontal (T10H) position of the friction couple and tester T11 with the axis in a vertical position. The research was planned with the use of the Tagutchi method in order to process parameter determination that enable the research results scatter to be minimised.

The analysis presented in the article concern the identification of the tribotester's influence on the dry friction coefficient in different conditions of the friction process. Based on experimental results, conducted for different materials on different tribotesters, the process parameters of humidity, load, and velocity influence on the measurements of the friction coefficient was also estimated.