

**Magdalena TRZOS\***

## **WPLYW URZĄDZENIA BADAWCZEGO I PARAMETRÓW PROCESU TARCIA NA ROZRZUT ZUŻYCIA**

### **THE INFLUENCE OF TRIBOTESTER AND FRICTION PROCESS PARAMETERS ON WEAR SCATTER**

#### **Słowa kluczowe:**

porównywalność zużycia, rozrzut wyników, testowanie zużycia, tribotester

#### **Key words:**

comparability of wear, results scatter, wear testing, tribotester

#### **Streszczenie**

Wartości zużycia uzyskiwane w badaniach tribologicznych dla tych samych skojarzeń materiałowych uzyskiwane w porównywalnych warunkach mogą różnić się znacząco. Wpływ parametrów procesu tarcia na porównywalność i powtarzalność zużycia pozostaje niewyjaśniony. W artykule przedstawiono wyniki badań ukierunkowanych na identyfikację wpływu parametrów procesu, urządzenia testowego oraz skojarzenia ma-

---

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

teriałowego pary tarciowej na rozrzuty wyników. W przeprowadzonych procesach tarcia uwzględniono trzy różne skojarzenia materiałowe oraz różne wartości parametrów: wilgotności, obciążenia i prędkości. Badania powtórzono na trzech tribotesterach. Wykorzystano metodę Taguchiego do zaplanowania eksperymentu optymalizacyjnego w celu wyznaczenia wartości parametrów dla poprawy precyzji oszacowania zużycia. Przeprowadzone analizy wykazały istotny wpływ skojarzenia materiałowego oraz niewielkie znaczenie urządzenia testowego na rozrzut wyników oraz porównywalność zużycia wyznaczonego na różnych tribotesterach.

## WPROWADZENIE

Rozwój wiedzy tribologicznej w dużej mierze warunkowany jest wynikami badań eksperymentalnych dostarczających informacji na temat tarcia i zużywania materiałów i elementów w różnych uwarunkowaniach tribologicznych. Informacja z badań testowych ograniczona jest jednak założeniami prowadzenia eksperymentu, w tym np. zastosowanymi urządzeniami testowymi. Wyniki badań wskazują na zależność powtarzalności wyników od skojarzenia materiałowego [L. 1] oraz konfiguracji węzła tarcia [L. 2]. Niewielkie znaczenie urządzeń badawczych, przy takiej samej konfiguracji węzła tarcia, w wyznaczeniu współczynnika tarcia wykazano w [L. 3], w badaniach tych uzyskano zmniejszenie rozrzutu wyników pomiaru współczynnika tarcia wraz ze wzrostem obciążenia (zależność w przybliżeniu liniowa). Różne właściwości tribologiczne obserwowane są w zależności od parametrów procesu. Różne wartości zużycia uzyskiwano przez zmianę np. wilgotności, prędkości i obciążenia. W badaniach wpływu wilgotności, obciążenia i wielkości ziarna na tarcie i zużycie stali nierdzewnej zaobserwowano zmniejszenie zużycia przy wzroście wilgotności w warunkach obciążenia 2 N [L. 4] (ball-on-disk tribometer), przy bardzo małych obciążeniach tendencja była odwrotna. Skokową zmianę (dziesięciokrotne zmniejszenie) wskaźnika zużycia stali węglowych w teście pin-on-disc przy zmianie wilgotności w przedziale od 45% do 55% wykazano w badaniach przedstawionych w [L. 5]. Większe wartości wskaźnika zużycia tribologicznego kompozytów ( $Ti_3AlC_2/Al_2O_3$ ) ze wzrostem obciążenia uzyskano w badaniach przedstawionych w artykule [L. 6]. Z kolei w artykule [L. 7] autor przedstawił wyniki badań zużycia kompozytu (PA6 na stali), z których wynika, że wzrost obciążenia powoduje mniejsze zużycie liniowe. Różny w za-

leżności od obciążenia wpływ prędkości na ubytek masy próbki ze stali bainitycznej uzyskano w badaniach [L. 8] wpływu obciążenia i prędkości na zużycie stali.

Przedmiotem analiz przedstawionych w niniejszym artykule są różnice wyników wyznaczenia na różnych urządzeniach testowych wartości zużycia oraz analiza wpływu parametrów procesu na rozrzut wyników pomiaru zużycia. Badania optymalizacyjne ze względu na rozrzut wyników badań przeprowadzono z zastosowaniem metody Taguchiego do wyznaczenia planu eksperymentu [L. 9]. Metoda ta została opracowana w celu optymalizacji jakości wyrobów, z wykorzystaniem teorii planowania eksperymentu. Obecnie z dobrym skutkiem znajduje zastosowanie w różnych obszarach wiedzy, między innymi do optymalizacji właściwości powłok [L. 10], do analiz parametrów procesów technologicznych [L. 11, 12], wpływu parametrów procesu na zużycie [L. 13, 14].

## OPIS EKSPERYMENTU

### *Przedmiot badań*

Badania dotyczyły wartości zużycia trzech różnych skojarzeń materiałowych poddanych procesowi tarcia bez smarowania. Celem badań była identyfikacja wpływu zarówno parametrów procesu, jak i skojarzenia materiałowego na rozrzut wyników wyznaczenia wartości zużycia. Wśród analizowanych parametrów uwzględniono: wilgotność, obciążenie oraz prędkość. Przyjęto trzy poziomy wartości dla każdego z parametrów (Tab. 1).

**Tabela 1. Poziomy i wartości parametrów uwzględnione w badaniach**

Table 1. The research processes parameters levels and values

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

\* AISI 52100, \*\* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, \*\*\*CrN

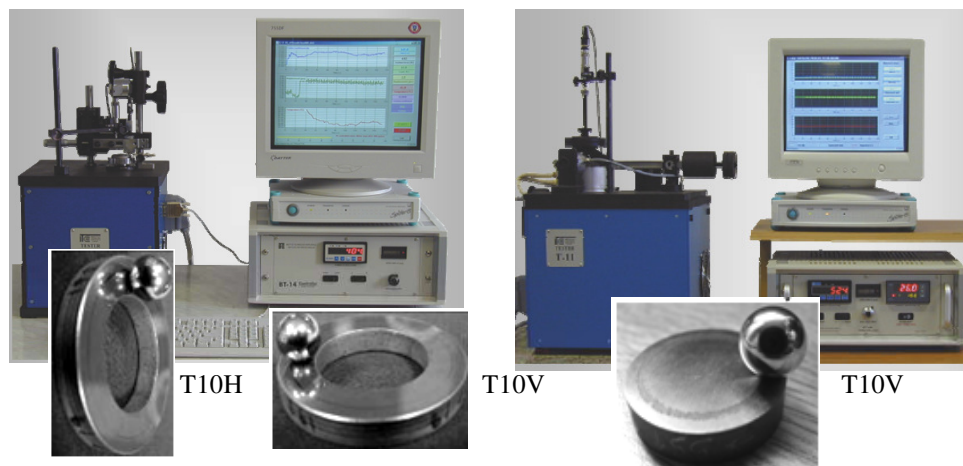
Droga tarcia we wszystkich analizowanych przypadkach wynosiła 1000 m. Badania zostały powtórzone na trzech różnych urządzeniach badawczych, pozwoliło to na przeanalizowanie wpływu urządzenia testowego na wynik wartości zużycia pary trącej.

Analizie poddano zarówno możliwości porównywania wyników badań przeprowadzonych na różnych urządzeniach badawczych, przy takich samych parametrach procesu, jak również powtarzalność wyników na każdym z urządzeń na podstawie rozrzutu. Poszukiwano warunków prowadzenia procesu tarcia zapewniających możliwie najmniejszy rozrzut zużycia badanych skojarzeń materiałowych. Zgodnie z przyjętymi założeniami do badań wytypowano 4 zmienne (skojarzenie materiałowe, wilgotność, obciążenie, prędkość), każdą o trzech wartościach. Eksperyment całkowity wymagał, przy tych założeniach, przeprowadzenia 81 procesów powtórzonych pięciokrotnie na każdym z trzech urządzeń testujących, co wyniosło w sumie 1215 procesów tarcia. W celu zbudowania planu eksperymentu ograniczającego liczbę eksperymentów oraz dającego użyteczną informację na temat możliwości minimalizacji rozrzutu wybrano metodę Taguchiego.

Metoda wykorzystuje tablicę ortogonalną wyznaczającą, dla danej liczby zmiennych oraz przyjętej liczby ich poziomów wartości, plan eksperymentu pozwalający przy minimalnej liczbie układów eksperymentu uzyskać maksymalną liczbę nieobciążonych efektów głównych. Pozwala to więc, przy możliwie małej liczbie eksperymentów, wyznaczyć wartości czynników istotnych ze względu na maksimum funkcji kryterium.

### *Urządzenia badawcze*

Porównano wyniki zużycia z procesów przeprowadzonych na trzech różnych urządzeniach testowych – testerach tribologicznych wykorzystywanych do badania podstawowych właściwości tribologicznych materiałów, umożliwiających wyznaczenie średniego współczynnika tarcia węzła oraz zbadanie charakterystyk zużywania powierzchni trących. W badaniach wykorzystano profesjonalne urządzenia testujące T10 z węzłem kula–pierzścień i T11 z węzłem kula–tarcza (**Rys. 1**) wykonane w Instytucie Technologii Eksploatacji – PIB. Wykorzystano dwie opcje urządzenia T10 – z pionowym (T10V) i poziomym (T10H) ustawieniem osi obrotu próbki.



**Rys. 1. Urządzenia testujące wykorzystane w badaniach. Urządzenie z węzłem tarcia kula–pierścieni T10H z poziomym, T10V z pionowym, ustawieniem osi obrotu próbki, T11V – kula–tarcza z pionowym ustawieniem osi obrotu próbki**

Fig. 1. Testers used in research. The ball on ring friction contact – T10H tribotester with horizontal and T10V with vertical position of sample's axle, the ball on disc friction contact – T11V with vertical position of sample's axle

Wartość objętości zużycia wyznaczano na podstawie trzech pomiarów (co  $120^\circ$ ) śladu zużycia na profilografie Form Talysurf PGI 830 firmy Taylor Hobson. Do wykonania profili wykorzystano czujnik z głowicą laserową PGI 830 o promieniu zaokrąglenia ostrza  $R = 2 \mu\text{m}$  i kącie  $90^\circ$ . Topografię uzyskano dla zakresu przesuwu czujnika – 8 mm, prędkości przesuwu czujnika 0,25 mm/s oraz skoku stolika – 0,02 mm.

## ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

### *Analiza sygnału do szumu zgodnie z metoda Taguchiego*

Uzyskane wyniki wartości średniej zużycia próbki w warunkach prowadzenia procesu tarcia zgodnie z planem eksperymentu wg metody Taguchiego na różnych urządzeniach testowych przedstawiono w **Tab. 2**.

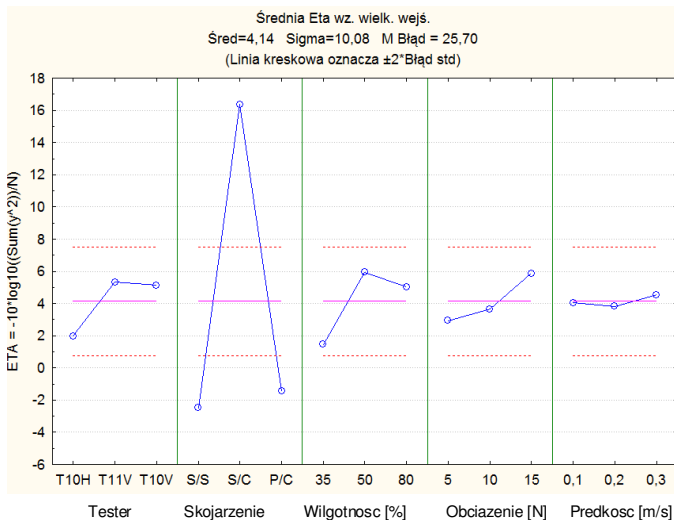
Przeprowadzono analizy funkcji kryterium (ETA) przyjętej zgodnie z metoda Taguchiego jako stosunek sygnału do szumu i opisującej wartość rozrzutu wyników z pięciu powtórzeń procesu dla poszczególnych układów eksperymentu. Funkcja ETA, zgodnie z przyjętą metodą, jest funkcją logarymiczną konstruowaną w taki sposób, aby jej maksimum wskazywało najlepszy zestaw parametrów dla analizowanego obiektu badań.

**Tabela 2. Wartości parametrów w poszczególnych układach eksperymentu oraz uzyskane wartości średnie zużycia**

Table 2. The value of process parameters of experiments and values of wear

Nr testu	Poziom wartości parametru procesu				Wyznaczona wartość średnia zużycia [mm <sup>3</sup> ]		
	M	H [%]	P [N]	V [m/s]	T10H	T10V	T11V
1	S/S	35	5	0,1	0,0036	0,0004	0,0028
2	S/S	50	10	0,2	0,0042	0,0204	0,0134
3	S/S	80	15	0,3	0,0072	0,0052	0,0288
4	S/C	35	10	0,3	0,1424	0,1198	0,1198
5	S/C	50	15	0,1	0,2064	0,1892	0,2058
6	S/C	80	5	0,2	0,034	0,034	0,0472
7	P/C	35	15	0,2	0,0846	0,009	0,0238
8	P/C	50	5	0,3	0,0062	0,0026	0,0082
9	P/C	80	10	0,1	0,0202	0,0026	0,039

W przeprowadzonych badaniach analizowano rozrzut wyników z poszczególnych powtórzeń procesu odniesiony do wartości średniej zużycia wyznaczonej dla tego procesu. Rozrzut obliczano jako średnią wartość różnic (każdy z każdym) z pięciu prób. Poszukiwano możliwości zminimalizowania rozrzutu wyników.



**Rys. 2. Wykresy funkcji ETA dla rozrzutu odniesionego do wartości średniej zużycia w zależności od przyjętych zmiennych**

Fig. 2. The graph of ETA function for scatter divided by average wear in dependence of process parameters

Maksima funkcji kryterium ETA na wykresach **Rys. 2** wskazują wartości poszczególnych zmiennych, najkorzystniejszych (w badanym zakresie wartości) ze względu na rozrzut wyników odniesiony do wartości średniej zużycia.

Przedstawione wartości funkcji ETA przy różnych wartościach analizowanych zmiennych wskazują, że poza skojarzeniem materiałowym, które zdecydowanie wpływa na powtarzalność wyników zużycia, najgorszą powtarzalność uzyskano na testerze T10H, najlepszą przy wilgotności 50% oraz obciążeniu 15 N. Prędkość praktycznie nie miała wpływu na powtarzalność wyników w badanych procesach.

Przeprowadzona analiza wariancji nie dała jednak podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej mówiącej o braku wpływu zmiennych: tester, wilgotność oraz obciążenie. Dlatego uogólnienie uzyskanego wyniku może być dokonane tylko odnośnie do zmiennej skojarzenie. W pozostałych wypadkach w celu wysnucia wniosków ogólnych niezbędne jest przeprowadzenie dodatkowych badań.

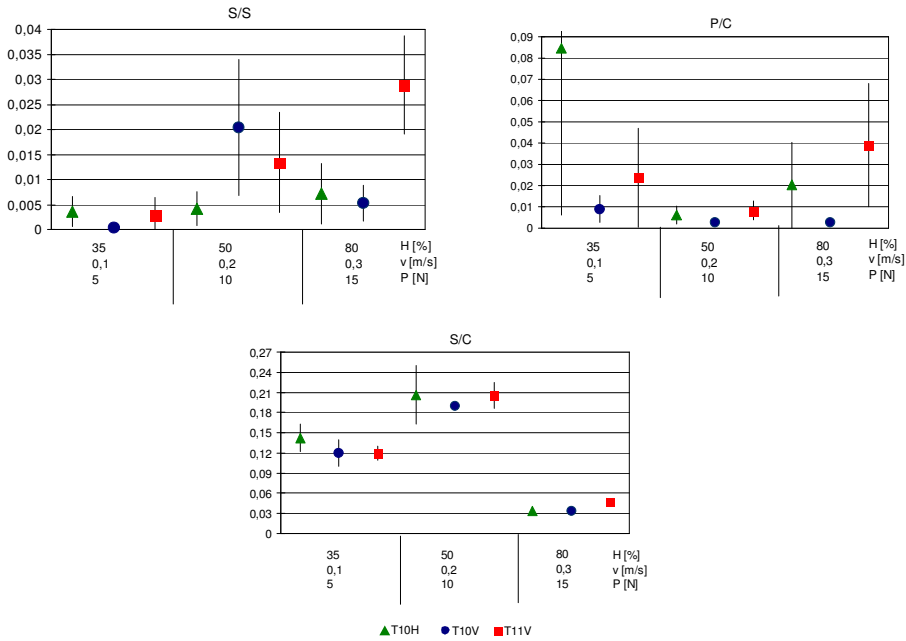
### *Analiza zużycia poszczególnych skojarzeń materiałowych*

Na **Rys. 3** przedstawiono dla poszczególnych skojarzeń materiałowych wartości średnie zużycia uzyskane przy tych samych parametrach procesu na różnych urządzeniach badawczych. Na wykresach zaznaczono również przedziały ufności obrazujące rozrzuty wyników.

Przedstawione (**Rys. 3**) wyniki wyznaczenia zużycia na różnych urządzeniach badawczych w przypadku skojarzenia stal–stal oraz stal z powłoką–ceramika pokazują bardzo duże różnice wartości średnich wyznaczonych na poszczególnych testerach tribologicznych oraz bardzo szerokie, w stosunku do wartości średniej, przedziały ufności wartości zużycia. Z przeprowadzonych analiz wynika, że dla uwzględnionych w badaniach zakresów parametrów procesu tarcia, na poszczególnych urządzeniach testowych, dla tych skojarzeń materiałowych zużycie nie jest powtarzalne.

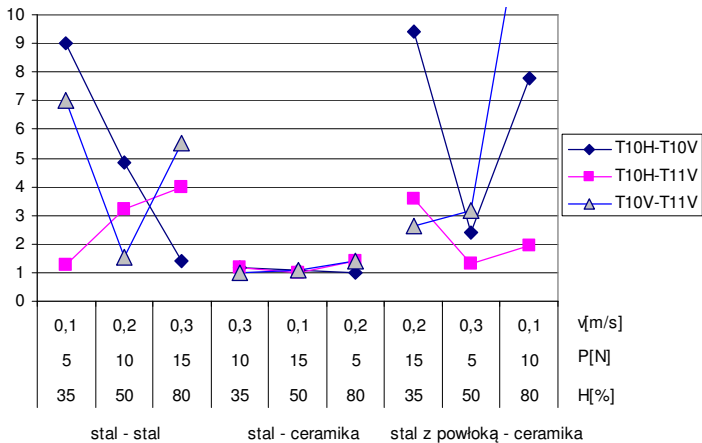
W przypadku skojarzenia stal–ceramika w przeprowadzonych procesach zużycia uzyskano znacznie lepszą powtarzalność wyników, przedziały ufności są wąskie, ich rozpiętość nie przekracza 10% wartości średniej zużycia. Małe są również dla tego skojarzenia różnice wartości średniej zużycia otrzymane na różnych urządzeniach badawczych.

W celu przedstawienia różnic średnich wartości zużycia uzyskanych przy tych samych parametrach procesu na różnych urządzeniach testowych dla tych samych skojarzeń materiałowych na wykresie (**Rys. 4**) przedstawiono ilorazy wartości średnich zużycia dla każdej z par urządzeń.



Rys. 3. Wartości średnie zużycia poszczególnych skojarzeń materiałowych uzyskane na różnych urządzeniach badawczych

Fig. 3. The average wear of individual materials got on different tribotesters



Rys. 4. Ilorazy średnich wartości zużycia poszczególnych skojarzeń materiałowych dla każdej pary urządzeń badawczych w procesach tarcia o takich samych parametrach

Fig. 4. The ratio of average wear values of individual material in friction process of the same parameters calculated for each two testers



Przedstawione wyniki wskazują, że w większości przypadków najmniejsze różnice między wartościami zużycia na różnych testerach uzyskano przy wilgotności 50%. Analizując wpływ obciążenia na te różnice, można wytypować wartość 15 N (z zakresu analizowanych wartości) jako obciążenie najkorzystniejsze ze względu na badane różnice.

Wartości średnie zużycia skojarzenia stal–stal oraz stal z powłoką CrN–ceramika uzyskane z procesów tarcia przeprowadzonych na różnych urządzeniach różnią się znacząco, dla skojarzenia P/C nawet ponad dziesięciokrotnie.

Natomiast dla skojarzenia stal–ceramika wartości zużycia z różnych urządzeń testowych są zbliżone. Największe różnice dla tego skojarzenia otrzymano w przypadku małego obciążenia (5 N). Wartości zużycia uzyskane na stanowisku T11V w tym przypadku były ok. 1,3 razy większe niż wartości z pozostałych urządzeń testowych. Różnice wartości zużycia skojarzenia materiałowego stal–ceramika w przypadku obciążenia 15 N uzyskane z poszczególnych urządzeń testowych nie przekroczyły 8% wartości średniej ze wszystkich testerów.

## WNIOSKI

Przeprowadzone badania wykazały występowanie znacznych różnic wpływu analizowanych parametrów i urządzeń na wartość zużycia i jego rozrzut. Zdecydowanie największy znaczenie dotyczące porównywalności i powtarzalności wyników ma skojarzenie materiałowe. Na podstawie analiz uzyskanych wyników wyprowadzono następujące wnioski dotyczące pomiarów zużycia.

1. Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że proces zużywania jest powtarzalny tylko w przypadku skojarzenia materiałowego stal–ceramika. Powtarzalność wyników uzyskano praktycznie w całym zakresie analizowanych parametrów.
2. Bardzo duże rozrzuty wartości zużycia dla skojarzeń stal–stal oraz stal z powłoką–ceramika wskazują na niestabilność procesu zużycia tych skojarzeń w całym obszarze analizowanych parametrów.
3. Największymi rozrzutami obarczone były wyniki zużycia wyznaczone na testerze z poziomą osią obrotu próbki. Pozostałe testery charakteryzował zbliżony poziom rozrzutów.
4. Wyniki zużycia uzyskane z procesów przeprowadzonych na różnych testerach dla skojarzenia stal–ceramika są porównywalne (w badanym obszarze parametrów).

5. Uzyskane wyniki wskazują, że porównywalność wyników (uzyskanych na analizowanych testerach) jest najlepsza dla procesów przeprowadzonych w wilgotności 50% oraz obciążeniu 15 N.
6. Najlepszą powtarzalność wyników na poszczególnych testerach, uzyskano przy wilgotności 50% i obciążeniu 15 N. Wniosek ten jednak wymaga weryfikacji po przeprowadzeniu dodatkowych badań.

## LITERATURA

1. Czichos H., Becker S., Lexow J.: International multilaboratory sliding wear tests with ceramics and steel. *Wear* 135 (1989), 171–191.
2. Suzuki M.: Comparison of tribological characteristics of sputtered MoS<sub>2</sub> films coated with different apparatus. *Wear* 218 (1998), 110–118.
3. Trzos M.: Analiza wpływu urządzenia badawczego na wyznaczenie współczynnika tarcia. *Tribologia* 6/2010 (234) 2010, s. 123–135.
4. Bregliozzi G., Ahmed S.I.-U., Schino A. Di, Kenny J.M., Haefke H.: Friction and wear behavior of austenitic stainless steel: influence of atmospheric humidity, load range, and grain size. *Tribology Letters*, Vol. 17, No. 4, November 2004 (p. 697–704).
5. Oh H.K., Yeon K.H., Kim H.Y.: The influence of atmospheric humidity on the friction and wear of carbon steels. *Journal of Materials Processing Technology* 95 (1999), 10–16.
6. Ling Wu, Ji-xin Chen, Ming-yue Liu, Yi-wang Bao, Yan-chun Zhou: Reciprocating friction and wear behavior of Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> and Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites against AISI52100 bearing steel *Wear* 266 (2009), 158–166.
7. Kleszczyński A.: Wpływ obciążenia na tarcie kompozytu poliamidowo-stalowego po stali. *Tribologia* 3/2005, 139–146.
8. Bąkowski H., Służałek G.: Wpływ obciążenia i prędkości obrotowej na zużycie stali bainitycznej w skojarzeniu ślizgowym na stanowisku Amslera. *Tribologia* 3/2009, 11–18.
9. Pietraszek J.: Metoda Taguchi optymalizacji jakości, StatSoft Polska 1999.
10. Sahoo P., Pal S.K.: Tribological Performance Optimization of Electroless Ni–P Coatings Using the Taguchi Method and Grey Relational Analysis, *Tribol Lett* 28, (2007), 191–201.
11. Davim J.P.: Study of drilling metal–matrix composites based on the Taguchi techniques, *J. Mater. Process. Technol.* 132 (2003), 250–254.
12. Chow H.M., Lee S.M., Yang L.D.: Machining characteristic of friction drilling on AISI 304 stainless steel, *Journal of materials processing technology* 207, (2008), 180–186.
13. Wen J.L., Yang Y.K., Jeng M.C.: Optimization of die casting conditions for wear properties of alloy AZ91D components using the Taguchi method

- and design of experiments analysis. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* (2009) 41:430–439.
14. Basavarajappa S., Chandramohan G., Davim J.P.: Application of Taguchi techniques to study dry sliding wear behaviour of metal matrix composites *Materials and Design* 28 (2007), 1393–1398.

**Recenzent:**  
**Wiesław ZWIERZYCKI**

### **Summary**

**Wear values obtained from different tribological experiments for the same materials and process parameters can vary significantly. The influence of friction process parameters on reproducibility and comparability of wear is still unclear. In this article, the results of research on the influence identification of process parameters, testers and materials on wear scatter are presented. The conducted experiments included three different contact materials and changes in the following parameters: humidity, load, and sliding velocity. The tests were conducted on three tribotesters. The Taguchi method was used for the design of the experiment in order to identify parameter values that enable one to minimise the wear scatter. The research results analysis proved the significant influence of materials on scatter and the low importance of tribotester.**