

Magdalena TRZOS*

ZMIENNOŚĆ WYNIKÓW W ZAGADNIENIACH POWTARZALNOŚCI I ODTWARZALNOŚCI WYZNACZENIA CHARAKTERYSTYK TRIBOLOGICZNYCH

RESULT VARIATION RELATED TO A REPEATABILITY AND A REPRODUCIBILITY OF TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS

Słowa kluczowe:

współczynnik zmienności, zużycie, współczynnik tarcia, test tribologiczny, odtwarzalność wyników, powtarzalność wyników

Key words:

coefficient of variation, wear, friction coefficient, tribotesting, experimental research, results reproducibility, results repeatability

Streszczenie

Przedstawione w artykule rozważania dotyczą zagadnienia zmienności wyników badań tribologicznych prowadzonych w warunkach laboratoryjnych przy określonych parametrach procesu tarcia. Zmienność wyni-

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

ków badań analizowano w dwóch aspektach; pierwszy związany był z powtarzalnością charakterystyk tribologicznych: współczynnika tarcia i wartości zużycia, drugi dotyczył odtwarzalności wyników na różnych tribotesterach. Badaniom poddano charakterystyki tribologiczne trzech różnych skojarzeń materiałowych. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono zależność zmienności badanych charakterystyk od parametrów procesu. Na podstawie uzyskanych wyników wykazano dobrą odtwarzalność współczynnika tarcia oraz przy wyznaczonych parametrach procesu również niewielką zmienność w powtórzeniach badań szczególnie na tribotesterze T10V. W przypadku badań zmienności zużycia zaobserwowano silną jej zależność od skojarzenia materiałowego. Tylko dla skojarzenia materiałowego stal–ceramika na podstawie wartości współczynnika zmienności stwierdzono dobrą powtarzalność i odtwarzalność wyznaczanej charakterystyki w określonych warunkach prowadzenia procesu. Pomiary zużycia dla skojarzeń stal z powłoką CrN–ceramika oraz stal–stal nie są powtarzalne oraz odtwarzalne w przyjętym obszarze parametrów procesu tarcia.

WPROWADZENIE

W rozwoju wiedzy tribologicznej [L. 1] zdecydowanie dominują metody indukcyjne stosowane przez badaczy w celu rozwiązania problemów naukowych i aplikacyjnych. Źródłem wiedzy i podstawą tworzenia modeli opisowych zmierzających do przedstawienia obserwowanych zależności są głównie wyniki badań empirycznych, przeprowadzenie których wymaga z kolei opracowania modeli pozwalających na wyznaczenie interesujących badacza relacji wyjaśniających analizowane aspekty zjawiska tarcia czy też towarzyszącego mu procesu zużywania [L. 2–4].

Wyniki badań dotyczące podstawowych charakterystyk tribologicznych tarcia i zużycia uzyskane w wyniku eksperymentów prowadzonych na różnych urządzeniach badawczych oprócz znaczących różnic ilościowych wykazują często również różnice jakościowe. Różnice te mogą być powodowane przez warunki prowadzenia procesu tarcia, konstrukcję węzła tribologicznego itp. Wpływ parametrów procesu został potwierdzony i przedstawiony w licznych doniesieniach literaturowych. Przykładowo wykazano różny wpływ wilgotności zależnie od wartości obciążenia [L. 5], wpływ wilgotności i obciążenia na wartość charakterystyk tribologicznych ceramiki prezentowano między innymi w [L. 6], wyka-

zано również zmiany zużycia i współczynnika tarcia stali węglowej ze zmianą obciążenia [L. 7], w wyniku badań zaprezentowanych w [L. 8] wykazano zmiany charakterystyk tarciovych i zużyciovych warstw WC-Co pod wpływem parametrów procesu: obciążenia, prędkości oscylacji oraz drogi tarcia.

Różnice w uzyskiwanych wartościach współczynnika tarcia oraz wartości zużycia mogą być powodowane również zmiennością cech materiałowych elementów węzłów tarcia oraz zmiennością wyników związaną z zastosowanym urządzeniem badawczym. Analiza wpływu parametrów procesu oraz urządzenia badawczego na zmienność wyników badań tribologicznych stanowi przedmiot zainteresowania niniejszego artykułu.

Istotną miarą w analizach powtarzalności oraz odtwarzalności wyników, oprócz miar bezwzględnych jest odniesienie odchylenia standardowego wyników pomiaru do wartości średniej mierzonej cechy. Miara ta nazwana jest współczynnikiem zmienności i zazwyczaj jest podawana w procentach. Uwzględnienie współczynnika zmienności pozwala na oszacowaniu udziału błędu wynikającego z rozrzutu w wyznaczonej wartości średniej badanej cechy.

ZMIENNOŚĆ WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁOWYCH

Właściwości mechaniczne materiału charakteryzują się pewną losowością, która wynikać może np. z niejednorodności ich składu chemicznego czy też różnic w strukturze fizycznej.

Klasyczną miarą zróżnicowania jest współczynnik zmienności będący miarą względną, zdefiniowaną jako iloraz odchylenia standardowego

i wartości średniej $b_{\mu} = \frac{\sigma}{\bar{\mu}}$ gdzie: σ – odchylenie standardowe $\bar{\mu}$ –

wartość średnia cechy.

Z analizy losowego charakteru cech materiałowych przeprowadzonej przez W. Zwierzyckiego [L. 4] wynika, że poziom zmienności standardowych własności mechanicznych materiałów jest rzędu kilku setnych i nie przekracza wartości 0,1.

Z wyników badań przytoczonych przez W. Zwierzyckiego [L. 4] wynika, że zmienność zawartości poszczególnych pierwiastków w składzie stali 45 nie przekracza wartości 0,1. W przypadku własności mechanicznych materiałów metalicznych wartość współczynnika zmienności jest

również mniejsza od 0,1, np. dla udarności współczynnik wyniósł 0,07, wytrzymałości zmęczeniowej – 0,08, a dla modułu sprężystości dla różnych metali współczynnik zmienności wyniósł od 0,03 do 0,09.

Zmienność cech materiałów ma wpływ, poza innymi czynnikami, jak np. jakość wykonania, na zmienność trwałości współpracujących elementów maszyn i urządzeń. Badania trwałości elementów ciągników, cytowane w [L. 4], wykazały, że współczynnik zmienności dla wszystkich elementów łącznie wyniósł 0,37, największą wartość osiągnął dla kół zębatych – 0,66, najmniejszą dla części z połączeniami spawanymi – 0,3.

W przytoczonych [L. 4] badaniach zużycia stali 45 dla pięciu różnych partii stali odpowiadających normie (GOST 1050-74) A.F. Akse- now i A.Ja. Szepel uzyskali różne szybkości zużywania, współczynnik zmienności wyniósł w dwóch różnych eksperymentach odpowiednio: $w = 0,167$ oraz $w = 0,21$. W badaniach zużycia powierzchni kół zębatych V.G. Kuchtow i R.W. Kugel uzyskali współczynnik zmienności 0,56.

Przytoczone wyniki badań wskazują, że zmienność wyznaczenia wartości cech tribologicznych przekracza wartość współczynnika zmienności właściwości mechanicznych materiałów oraz zależy od rodzaju elementów współpracujących.

Z przeprowadzonych analiz wynika, że tylko do 0,1 wartości współczynnika zmienności wyznaczenia charakterystyk tribologicznych można tłumaczyć zmiennością właściwości mechanicznych materiałów, pozostała część zależy od innych czynników np. dokładności wykonania, montażu, eksploatacji, metody pomiarowej.

OPIS EKSPERYMENTU

Analizy zmienności wyników badań tribologicznych zostały przeprowadzone na podstawie wyników badań eksperymentalnych przeprowadzonych na testerach tribologicznych T-10 i T-11 z pionową (V) oraz T-10 z poziomą (H) konfiguracją przestrzenną (położeniem osi tarczy lub pierścienia), węzłów: kula–tarcza (T-11V) i kula–pierścień (T-10V i T-10H).

Badania zostały zaplanowane dla trzech różnych skojarzeń materiałowych przy różnych wartościach parametrów procesu: obciążenia, prędkości i wilgotności (**Tab. 1**) na drodze tarcia wynoszącej 1000 m. Każdy układ eksperymentu powtórzono pięć razy. Za miarę rozrzutu przyjęto odchylenie standardowe wyników.

Badania eksperymentalne przeprowadzono w warunkach tarcia suchego, w celu identyfikacji czynników wpływających na zmienność wyników pomiaru współczynnika tarcia oraz wartości zużycia. Analizowano zmienność wyników na poszczególnych testerach oraz zmienność średnich wartości z różnych tribotesterów.

Wartość współczynnika tarcia wyznaczano w pomiarach pośrednich, poprzez pomiary siły tarcia. W trakcie procesu wyniki rejestrowane były co 1 s.

Tabela 1. Wartości parametrów dla poziomów przyjętych w planie eksperymentu

Table 1. Value of the process parameters in the established levels

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

*AISI 52100, ** Al₂O₃, ***CrN.

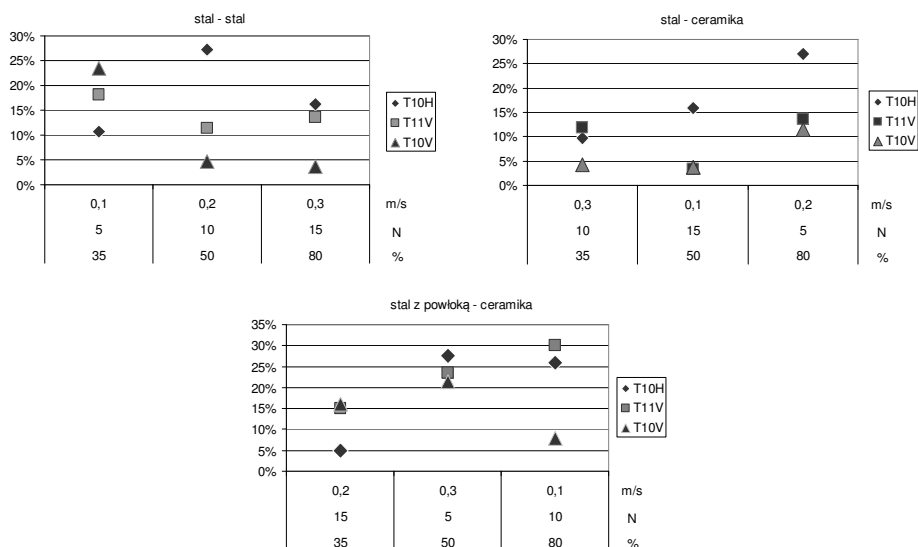
Wartość objętości zużycia wyznaczano po zakończeniu każdego testu na podstawie trzech pomiarów (co 120°) topografii zużycia na profilografie Form Talysurf PGI 830 firmy Taylor Hobson o rozdzielczości 0,8 nm (błąd pomiaru 0,001 mm). Do wykonania profili wykorzystano czujnik z głowicą laserową PGI 830 o promieniu zaokrąglenia ostrza R = 2 μm i kącie 90°. Topografię uzyskano dla zakresu przesuwu czujnika – 8 mm, skoku stolika – 0,02 mm oraz prędkości przesuwu czujnika 0,25 mm/s.

DYSKUSJA WYNIKÓW

W wyniku przeprowadzonych badań tribologicznych wyznaczono dla każdego skojarzenia materiałowego po pięć wartości (seria badań) współczynnika tarcia oraz zużycia przy różnych parametrach procesu. Badania powtórzono na trzech testerach.

Zmienność wyników badań na poszczególnych tribotesterach. Analiza powtarzalności

W przypadku analiz zmienności wyników dla każdego z tribotesterów wyznaczono odchylenie standardowe każdej z serii pomiarów oraz wartość średnią badanej charakterystyki tribologicznej. Na tej podstawie obliczono współczynniki zmienności charakterystyk tribologicznych dla każdego z tribotesterów, uzyskane przy różnych parametrach procesu oraz dla różnych skojarzeń materiałowych. Zmienność współczynnika tarcia na poszczególnych tribotesterach przedstawiono na **Rys. 1**, a zmienność zużycia na **Rys. 2**.



Rys. 1. Współczynniki zmienności współczynnika tarcia różnych skojarzeń materiałowych wyznaczonego na poszczególnych tribotesterach

Fig. 1. Coefficients of the variation of friction coefficient, for different pairs' materials, that was measured with the use of the particular tribotester

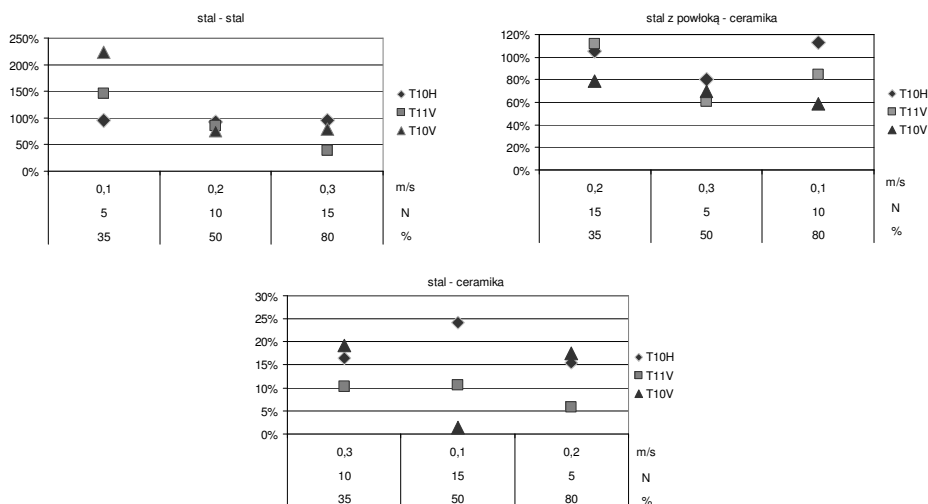
Porównując wyniki uzyskane na poszczególnych tribotesterach, najmniejszą zmiennością współczynnika tarcia charakteryzuje się tribotester T10V.

Z przeprowadzonych analiz wynika, że zmienność tarcia dla badanych skojarzeń materiałowych na wszystkich tribotesterach zależy od parametrów procesu. Dokonane analizy wskazują na najsilniejszy, spośród wszystkich parametrów, wpływ obciążenia na wartość współczynni-

ka zmienności pomiarów na testerach z pionową konfiguracją przestrzenną węzłów tarcia. W punktach pomiarowych, w których obciążenie było najmniejsze (5 N), obserwowano średnio największą wartość współczynnika zmienności. Przy obciążeniu 15 N dla wszystkich skojarzeń materiałowych współczynnik zmienności tarcia nie przekroczył wartości 0,15. W przypadku tribotestera T10H z poziomym ustawieniem osi pierścienia oraz kierunkiem zadawania siły najmniejszą zmienność współczynnika tarcia uzyskiwano przy najmniejszej wilgotności.

Wyniki analiz dotyczących zmienności wartości zużycia wyznaczonej w seriach po 5 prób na każdym z tribotesterów przedstawiono na **Rys. 2**. Pokazano na nim wartości współczynnika zmienności zużycia wyznaczone na każdym z tribotesterów dla poszczególnych skojarzeń materiałowych przy różnych parametrach procesu.

Przedstawione wartości współczynników zmienności zużycia tarciowego wskazują silną ich zależność od skojarzenia materiałowego. Zmienność zużycia dla skojarzenia S/C jest ok. dziesięciokrotnie mniejsza niż dla pozostałych dwóch skojarzeń materiałowych.



Rys. 2. Współczynniki zmienności wyznaczenia zużycia różnych skojarzeń materiałowych na poszczególnych tribotesterach

Fig. 2. Coefficients of the variation of wear for different pairs' materials, that was measured with the use of the particular tribotester

W przypadku skojarzeń stal–stal oraz stal z powłoką–ceramika zmienność przekraczała we wszystkich analizowanych punktach pomia-

rowych 50%. Wynikało to głównie z bardzo małych wartości zużycia dla tych skojarzeń materiałowych. W przypadku bardzo małych wartości zużycia odchylenie standardowe wyników w serii pomiarów osiągało wartość przekraczającą wartość średnią wielkości mierzonej.

Z przeprowadzonych badań wynika, że w większości analizowanych przypadków najgorszą powtarzalność zużycia uzyskano na testerze T-10H. Porównanie pozostałych dwóch testerów nie dało jednoznacznej odpowiedzi. Różnie sytuacja przedstawiała się zarówno dla skojarzeń materiałowych, jak i dla parametrów procesu, nie zaobserwowano w tym obszarze wyraźnych trendów. Wynika z tego, że w przypadku pomiaru wartości zużycia skojarzeń materiałowych, niekorzystna, ze względu na rozrzut wyników, jest konfiguracja węzła tarcia z poziomym ustawieniem osi zadawania obciążenia.

Zmienność wyników badań między tribotesterami.

Analiza odtwarzalności

Zróznicowanie średnich wartości współczynnika tarcia wyznaczonych na różnych tribotesterach zostało oszacowane na podstawie wartości współczynnika zmienności wyników między testerami. Współczynniki zmienności obliczono jako ilorazy odchylenia standardowego do wartości średniej współczynnika tarcia z trzech tribotesterów:

$$w = 3 \times \frac{\sigma(\bar{\mu}_1, \bar{\mu}_2, \bar{\mu}_3)}{\mu_1 + \mu_2 + \mu_3},$$

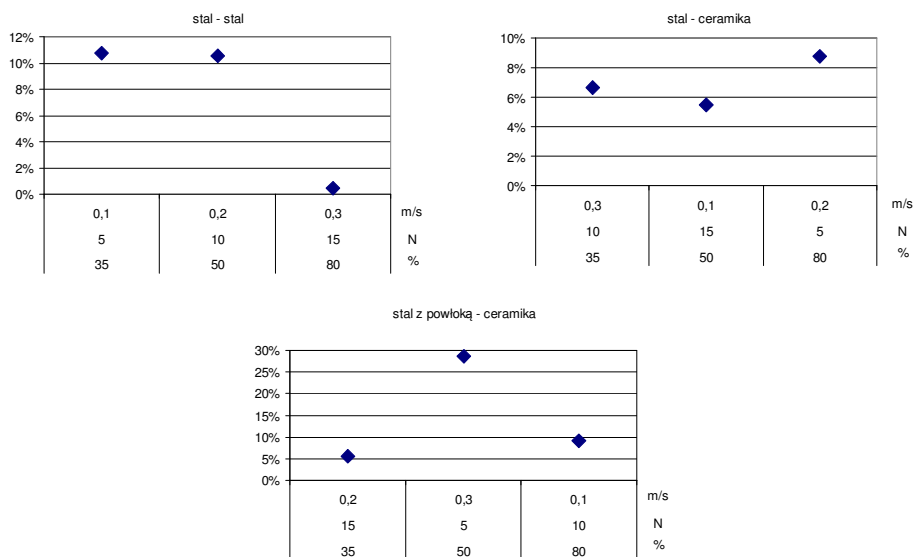
gdzie: σ – odchylenie standardowe wartości średnich wielkości badanej na poszczególnych tribotesterach,

$\bar{\mu}_i$ – wartość średnia wielkości badanej wyznaczona na i -tym tribotesterze.

Na **Rys. 3** przedstawiono zmienność wartości współczynnika tarcia wyznaczonych na różnych tribotesterach. Zobrazowano zmienność współczynnika tarcia dla różnych skojarzeń materiałowych w zależności od parametrów procesu.

Pokazane na **Rys. 3** wyniki wskazują na niewielką zmienność wartości średnich współczynnika tarcia pomiędzy analizowanymi tribotesterami.

mi. W całym obszarze pomiarowym zmienność nie była większa niż 0,11, poza przypadkiem dla skojarzenia stal z powłoką-ceramika w punkcie (0,3 m/s, 5 N, 50%). W tym punkcie wartość μ wyznaczona na T-11V znacznie odbiegała od wartości μ z pozostałych tribotesterów.



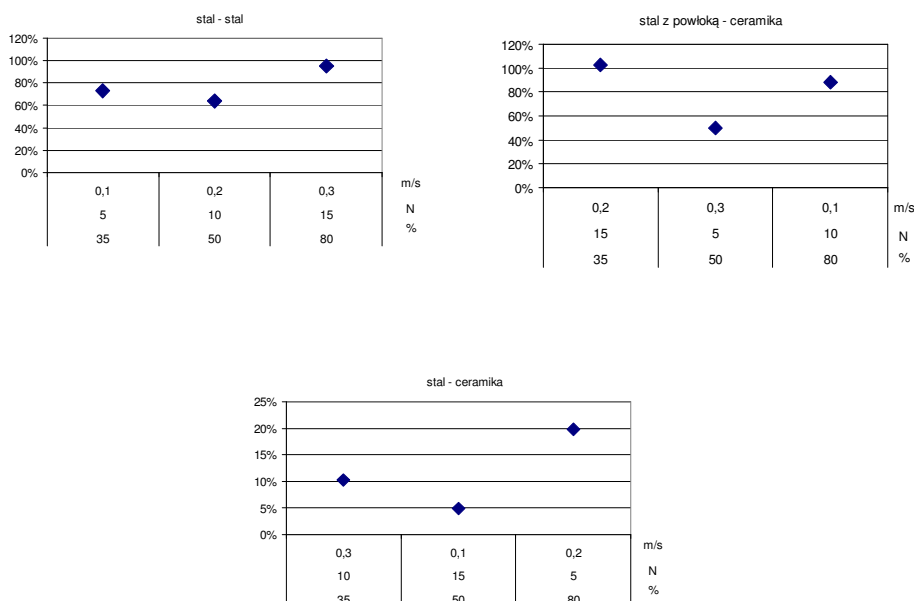
Rys. 3. Zmienność wartości średnich współczynnika tarcia wyznaczonych na różnych tribotesterach

Fig. 3. Coefficients of the variation of the average values of friction coefficients from different tribotesters

Współczynnik zmienności w analizowanym obszarze wykazywał tendencję malejącą wraz ze wzrostem obciążenia. Najmniejszą zmienność, dla wszystkich skojarzeń materiałowych, uzyskano w punktach przy obciążeniu 15 N.

Z przeprowadzonych badań wynika, że wartości średnie wyznaczone na różnych tribotesterach charakteryzują się małą zmiennością, znacznie mniejszą od zmienności współczynnika tarcia w pomiarach na poszczególnych tribotesterach. Małe wartości uzyskano zwłaszcza w punktach pomiarowych z największym obciążeniem (15 N). W tych przypadkach, dla wszystkich skojarzeń materiałowych, zmienność wartości średnich współczynnika tarcia wyznaczonych na różnych tribotesterach była $\leq 0,05$.

Analogicznie do analizy dotyczącej zmienności wartości średnich współczynnika tarcia wyznaczonych na różnych tribotesterach przeprowadzono analizy dotyczące współczynnika zmienności wartości zużycia. Odniesienie odchylenia standardowego do wartości średniej zużycia wyznaczonego na różnych tribotesterach, w poszczególnych punktach przestrzeni pomiarowej, pokazano na **Rys. 4**. Zobrazowano w ten sposób zmienność współczynnika tarcia dla różnych skojarzeń materiałowych wyznaczanego na różnych urządzeniach testujących.



Rys. 4. Współczynniki zmienności wartości zużycia wyznaczonych na trzech różnych tribotesterach

Fig. 4. Coefficients of the variation of the average values of wear from different tribotesters

Wartości zużycia skojarzeń materiałowych stal–stal oraz stal z powłoką ceramika charakteryzuje duża zmienności od 50% do ponad 100%. Tak wysoka zmienność czyni uzyskane na różnych tribotesterach wartości zużycia tych skojarzeń nieodtworzalnymi w obszarze analizowanych parametrów procesu zużywania. W przypadku skojarzenia stal–ceramika zmienność wartości zużycia wyznaczonych na różnych tribotesterach zmniejsza się wraz ze wzrostem obciążenia. W punkcie pomiarowym

z obciążeniem 15 N uzyskano niewielką, ok. 5% zmienność wyników. Zmienność w przypadku tego skojarzenia jest ujemnie skorelowana z zużyciem – współczynnik korelacji Pearsona $R = -0,99$. Z przeprowadzonych analiz wynika, że pomiar zużycia skojarzenia materiałowego stal – ceramika o wartości powyżej $0,1 \text{ mm}^3$ można uznać za odtwarzalny, współczynnik zmienności w tym przypadku jest mniejszy od 0,15.

WNIOSKI

Przeprowadzone analizy zmienności wyników wyznaczenia charakterystyk tribologicznych wykazały zależność współczynnika zmienności od parametrów prowadzenia procesu tarcia. Mniejszą wartość zmienności uzyskiwano przy większych obciążeniach. W przypadku wyznaczania współczynnika tarcia uzyskano najlepszą powtarzalność wyników na tribotesterze T10V. Na podstawie uzyskanych wyników wykazano, że dla wszystkich analizowanych skojarzeń materiałowych, przy odpowiednio dobranych parametrach procesu, zmienność pomiaru współczynnika tarcia nie powinna przekraczać 10%.

Analizy średnich wartości współczynnika tarcia wyznaczonych na różnych tribotesterach wykazały znacznie mniejszą ich zmienność niż w badaniach powtarzalności wyników na poszczególnych tribotesterach. Zmienność średnich wartości współczynnika tarcia wyznaczonych na uwzględnionych w badaniach tribotesterach zmniejszała się wraz ze wzrostem obciążenia, osiągając przy obciążeniu 15 N wartość nieprzekraczającą 5% dla każdego z badanych skojarzeń materiałowych. Pomiarzy współczynnika tarcia należy więc uznać za odtwarzalne.

W przypadku wyznaczenia wartości zużycia tylko dla skojarzenia materiałowego stal–ceramika wyniki można uznać za powtarzalne: na tribotesterze T11V w całym analizowanym obszarze parametrów procesu tarcia, na T10V przy obciążeniu 15 N. Najgorszą, powyżej 15%, powtarzalność uzyskano na tribotesterze T10H. Podobnie jak w przypadku współczynnika tarcia, również dla zużycia uzyskano mniejszą zmienność zużycia w analizach odtwarzalności niż powtarzalności wyników. Dla skojarzenia stal–ceramika zmienność średnich wartości zużycia wyznaczonych na różnych tribotesterach tylko przy małym obciążeniu (5 N) przekroczyła wartość 10%.

Duża zmienność wartości zużycia skojarzeń materiałowych stal–stal oraz stal z powłoką–ceramika nie pozwala uznać pomiarów tej wielkości za powtarzalne w analizowanym obszarze parametrów procesu tarcia.

LITERATURA

1. Trzos M.: Badania eksperymentalne w rozwiązywaniu problemów tribologicznych. *Tribologia* 3/2007 (213) 2007, s. 285–302.
2. Meng H. C., Ludema K. C.: Wear models and predictive equations: their form and content. *Wear* 181–183 (1995), pp. 443–457.
3. Andersson S, Soderberg A., Bjorklund S.: Friction models for sliding dry, boundary and mixed lubricated contacts. *Tribology International* 40 (2007) 580–587.
4. Zwierzycki W.: Prognozowanie niezawodności zużywających się elementów maszyn. Biblioteka Problemów Eksploatacji. Instytut Technologii Eksploatacji 1998.
5. Bregliozzi G., Ahmed S.I.-U., Di Schino A., 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).
6. Ziebert C., Zum Gahr K.-H.: Microtribological properties of two-phase Al₂O₃ ceramic studied by AFM and FFM in air of different relative humidity. *Tribology Letters*, Vol. 17, No. 4, November 2004 (901–909).
7. Amamoto Y., Goto H.: Friction and wear of carbon steel near T1-transition under dry sliding. *Tribology International* 39 (2006) 756–762.
8. Bonny K., De Baets P., Perez Y., Vleugels J., Lauwers B.: Friction and wear characteristics of WC–Co cemented carbides in dry reciprocating sliding contact. *Wear* 268 (2010) 1504–1517.

Recenzent:
Janusz JANECKI

Badania finansowane ze środków na naukę w ramach projektu badawczego nr N N504 286537 w latach 2009–2012.

Summary

The considerations presented concern the issue of the variation of tribological research results. The research was conducted within the

chosen area of process parameters in a tribological laboratory. The variations of experimental results are analysed in two aspects. The first one concerns the repeatability of tribological properties – the friction coefficient and the value of wear. The second concerns the reproducibility of results from different tribotesters. The research encompassed the tribological properties of three different pairs of materials and proved the dependence of the variation of measured properties on the process parameters. Based on the results, the research proved both good reproducibility of the friction coefficient and good repeatability for particular tribotesters, especially for the T10V, if the values of process parameters are suitably established. In the case of wear, the strong influence of the materials on the wear variation was observed. For only the frictional pair steel–ceramics was the possibility of achieving good reproducibility and repeatability proved. In the area of analysed process parameters, for both the pairs steel-steel and steel with CrN-coating-ceramics, the measurements of tribological characteristics are neither reproducible nor repeatable.