

Andrzej BATOR^{*}, Piotr DUDA^{}, Remigiusz MICHALCZEWSKI^{*},
Grzegorz SŁUŻAŁEK^{***}, Zygmunt WRÓBEL^{****}**

ANALIZA SYSTEMÓW ZBIERANIA DANYCH POMIAROWYCH Z URZĄDZEŃ DO BADAŃ TRIBOLOGICZNYCH

THE ANALYSIS OF MEASUREMENT DATA COLLECTION SYSTEMS FROM THE TRIBOTESTERS

Słowa kluczowe:

charakterystyki tribologiczne, układ pomiarowy, wyzwalanie pomiarów w punkcie

Key words:

friction, wear, measuring system, tribological characteristics, trigger point

^{*} Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, ul. K. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, e-mail: remigiusz.michalczewski@itee.radom.pl.

^{**} Wydział Informatyki i Nauki o Materiałach, Uniwersytet Śląski, ul. Będzińska 39, 41-200 Sosnowiec, tel. (32) 36-89-745, e-mail: piotr.duda@us.edu.pl.

^{***} Wydział Informatyki i Nauki o Materiałach, Uniwersytet Śląski, ul. Śnieżna 2, 41-200 Sosnowiec, tel. (32) 36-89-569, e-mail: grzegorz.sluzalek@us.edu.pl.

^{****} Wydział Informatyki i Nauki o Materiałach, Uniwersytet Śląski, ul. Będzińska 39, 41-200 Sosnowiec, tel. (32) 36-89-736, e-mail: zygmun.wrobel@us.edu.pl.

Streszczenie

Przeprowadzając modelowe badania tribologiczne, dążąc do uzyskania wysokiej powtarzalności i odtwarzalności wyników, szczególną uwagę zwraca się na precyzyjne zadanie parametrów testu (prędkość ślizgania i obciążenie węzła) oraz kontrolę warunków otoczenia (temperatura, wilgotność). Jednocześnie często marginalizuje się sprawy związane z niedokładnością wykonania próbek. Niedokładności struktury geometrycznej powierzchni i kształtu są często spowodowane dodatkowymi procesami technologicznymi, realizowanymi po precyzyjnym wykonaniu bazy próbki. Powoduje to często zwiększenie bicia osiowego i promieniowego próbek. Może to spowodować błędną interpretację pomiaru intensywności zużywania liniowego oraz siły tarcia.

W celu wyeliminowania wpływu bicia osiowego na pomiar intensywności zużywania liniowego, autorzy opracowali koncepcję oraz zaprojektowali i wykonali zautomatyzowany, sterowany komputerowo układ wyzwalania pomiaru charakterystyk tribologicznych w funkcji położenia tarczy, a nie, jak dotychczas, w funkcji czasu.

System ten zastosowano w stanowisku T-01M opracowanym w ITeE – PIB Radom. Zmodyfikowane stanowisko poddano badaniom dwóch rodzajów skjarzeń materiałowych i przy dużej zmienności prędkości obrotowej węzła. Dodatkowo porównano wyniki charakterystyk tribologicznych uzyskane ze standardowego układu pomiarowego wyzwalanego czasem z uzyskanymi za pomocą opracowanego systemu.

Z przeprowadzonych badań wynika, że stosowanie zautomatyzowanego systemu wyzwalania pomiaru w funkcji położenia tarczy powoła na znaczne zmniejszenie rozrzutu wyników pomiarów przy niskich prędkościach obrotowych, a tym samym na poprawę powtarzalności i odtwarzalności badań tribologicznych w układzie kula–tarcza i trzpień–tarcza.

WPROWADZENIE

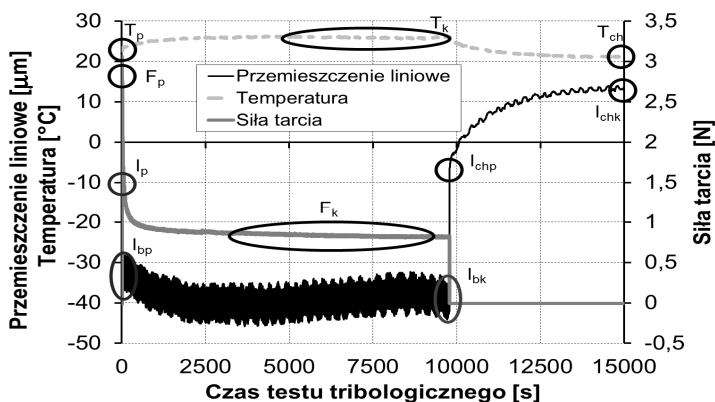
Podczas badań tribologicznych realizowanych z wykorzystaniem modelowych węzłów opartych na prostych próbkach, rejestrowane są najczęściej: siła tarcia, zużycie, temperatura ciała, oporność styku i drgania [L. 1, 2]. Ciągłe pomiary umożliwiają obserwację zmian charakterystyk tribologicznych w czasie. Obciążenie styku jest realizowane najczęściej za pomocą układu dźwigniowego i obciążników, więc zakłada się, że ma stałą wartość. Z powodów błędów kształtu elementów węzła oraz wzbudzanych tarciami drgań, obciążenie styku może się zmieniać nawet o 20% [L. 3]. Z tego też powodu powinno się brać pod uwagę dokładność wykonania elementów urządzenia badawczego bądź pomiar wartości obciążenia.

Pomiar w sposób ciągły wielkości zużycia umożliwia uzyskanie informacji o dynamice procesu zużywania. Wielokrotny montaż i demontaż próbek w celu

określenia metodą wagową wartości intensywności zużywania nie jest właściwym rozwiązaniem ze względu na wprowadzanie zmian w warunkach pracy styku. Powoduje to w początkowym etapie współpracy ponowne docieranie elementów wężła oraz zwiększa czas współpracy w warunkach niestabilizowanych.

Ciągła rejestracja przemieszczeń normalnych elementów wężła umożliwia określenie zużycia liniowego. Niestety w przypadku zastosowania takiej metodyki pomiarowej, błędy kształtu mogą znacząco zafałszować pomiar. Bicie osiowe próbki jest często rzędu setnych części milimetra, podczas gdy zużycie liniowe elementów wężła może mieć wartości $1\mu\text{m}$. Kolejnym czynnikiem zakłócającym jest dylatacja układu wężła tarcia, wywołana ciepłem tarcia. Zmiana wymiaru liniowego spowodowana rozszerzalnością termiczną ciał może być większa od wartości zużycia nawet o rząd wielkości. Bazując na metodzie eliminacji wpływu dylatacji na zużycie, opracowanej w Instytucie Technologii Eksploatacji w Radomiu [L. 4], opracowano własną metodykę analizy wyników charakterystyk tribologicznych.

W metodyce tej analizowano charakterystyki siły tarcia, przemieszczenia liniowego elementów wężła oraz temperatury mierzonej za pomocą termopary (umieszczonej w próbce lub zanurzonej w cieczy smarującej). Na **Rys. 1** przedstawiono położenia charakterystycznych punktów wykresu. Przedstawiona metodyka dotyczyła badań z wykorzystaniem stanowiska o rodzaju wężła typu trzpień–tarcza lub kula–tarcza produkcji ITeE o oznaczeniu T-01 lub T-11.



Rys. 1. Charakterystyki tribologiczne z punktami charakterystycznymi

Fig. 1. The tribological characteristics of the characteristic points

Zaznaczone na wykresach punkty charakterystyczne służyły do dalszej analizy i oznaczały: T_p – temperatura początkowa medium smarującego lub masa próbki, T_k – ustabilizowana temperatura masowa próbki lub roztworu na końcu biegu, T_{ch} – temperatura po etapie chłodzenia (powinna być taka sama

lub zbliżona do temperatury na początku testu), F_p – początkowa siła tarcia (ważna w układach o dużej dynamice zmian typu start–stop, F_k – ustabilizowana siła tarcia, l_p – wskazanie czujnika przemieszczenia przed testem, l_{bp} – wskazanie czujnika przemieszczenia na początku testu tribologicznego, l_{bk} – wskazanie czujnika przemieszczenia na końcu testu tribologicznego, l_{chp} – wskazanie czujnika na początku etapu chłodzenia, l_{chk} – położenie czujnika na końcu etapu chłodzenia.

Na podstawie wyznaczonych punktów charakterystycznych określono następujące wartości związane z pomiarami przemieszczeń liniowych węzła tarcia: P_{LZ} – przemieszczenie liniowe spowodowane zużyciem elementów skojarzenia, wyznaczone na podstawie wzoru:

$$P_{LZ} = l_{chk} - l_p \quad (1)$$

P_{LZR} – przemieszczenie liniowe spowodowane zużyciem i rozszerzalnością cieplną podczas testu:

$$P_{LZR} = l_{bk} - l_{bp} \quad (2)$$

P_{LR} – przemieszczenie liniowe spowodowane rozszerzalnością cieplną elementów węzła tarcia:

$$P_{LR} = l_{chk} - l_{chp} \quad (3)$$

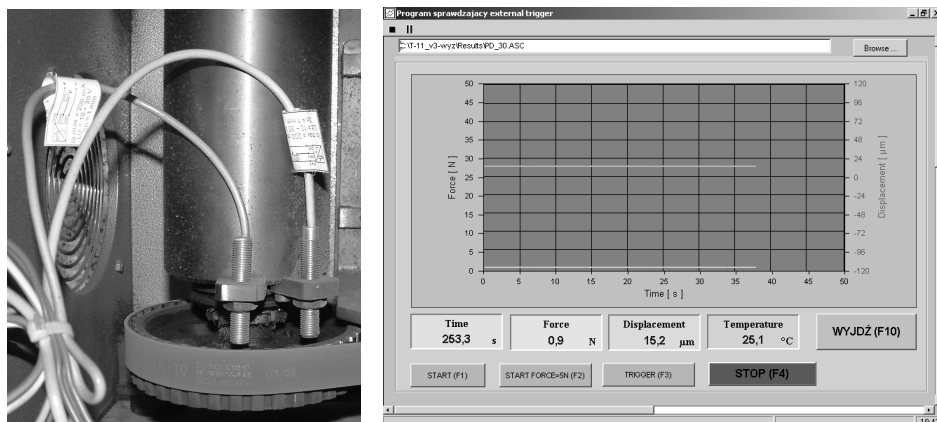
Wyżej opisaną metodykę zastosowano w wielu badaniach eksperymentalnych [L. 5, 6]. W przypadku stosowania jej, istotnym wymogiem jest precyzyjne wykonanie próbek oraz zachowanie wysokiego reżimu montażowego. Z dotychczasowych badań i analiz wynika, że układ ten generuje poprawne wyniki, gdy przemieszczenia liniowe powierzchni współpracy są mniejsze od wartości granicznej $l_g=10 \mu\text{m}$.

Niestety, bardzo często w praktyce badawczej stosujemy próbki, których dokładność wykonania znacznie odbiega od zalecanych. Przygotowanie obiektów badań powoduje nałożenie się błędów struktury geometrycznej powierzchni oraz zmian geometrycznych spowodowanych dalszymi modyfikacjami (związanymi z otrzymaniem warstwy o pożądanym właściwościach). Może skutkować to znacznymi zmianami wymiarów geometrycznych próbek. Rezultaty uzyskane w standardowy sposób dla takich obiektów nie pozwalają na precyzyjne ujęcie dynamiki procesów tribologicznych. Jednym ze sposobów poprawy jakości uzyskanych wyników, pozwalających wnioskować o charakterze tych procesów, jest przedstawiony w artykule system zbierania danych pomiarowych.

OBIEKT I METODYKA BADAŃ

W celu wyeliminowania niepożądanych przemieszczeń osiowych elementów węzła tarcia, autorzy zaprojektowali i wykonali modernizację stanowiska tribologicznego typu trzpień–tarcza [L. 7]. Modernizacja polegała na doposażeniu

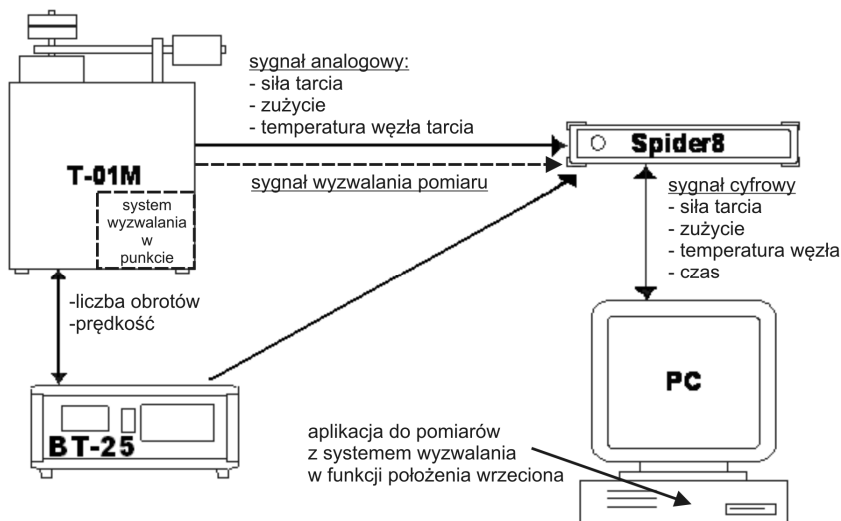
maszyny badawczej oraz modyfikacji oprogramowania pomiarowego (**Rys. 2**). Wykonana modyfikacja pozwala na pomiar siły tarcia, przemieszczenia normalnego elementów węzła i temperatury w tym samym punkcie na obwodzie wrzeciona maszyny badawczej. Powinno to wyeliminować wpływ falistości powierzchni przeciwpróbki i bicia wrzeciona na mierzone wartości przemieszczenia i siły tarcia. Urządzenie zostało doposażone o elementy przedstawione na schemacie stanowiska (**Rys. 3**).



Rys. 2. Wygląd testera T-01M i aplikacji pomiarowej po modyfikacji

Fig. 2. The view of the T-01M tester and the measuring software after modification

Z wykorzystaniem zmodyfikowanego stanowiska przeprowadzono badania porównawcze dla systemu wyzwalanego czasowo i za pomocą układu wyzwalania w funkcji położenia. Pierwszy rodzaj skojarzenia to skojarzenie trzpień–tarcza w warunkach tarcia technicznie suchego, gdzie materiałem próbki był trzpień z UHMWPE (Chirulen 1020) o średnicy 5 mm, a partnerem tribologicznym była tarcza ze stali S235. Badania przeprowadzono dla próbek o dużym biciu osiowym dla prędkości obrotowej wrzeciona 10 obr/min i częstotliwości próbkiowania 20 Hz. Wykonano także badania z różnymi wartościami próbkiowania (1, 2, 5, 10 i 20 Hz) i dla prędkości obrotowej 10, 15, 20, 30, 50, 80 obr/min. Wszystkie testy były prowadzone przez 300 s przy obciążeniu węzła 5 N, średnicy tarcia 25 mm, temperaturze otoczenia $21 \pm 10^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej $30 \pm 10\%$.



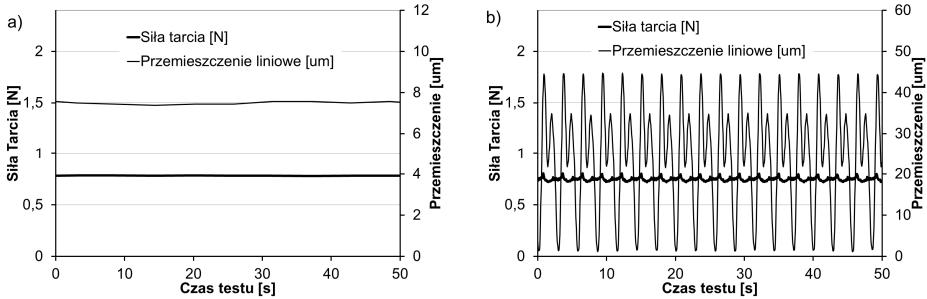
Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego T-01M po modyfikacji

Fig. 3. Schematic of the test T-01M after modification

Opracowany system zastosowano do badania charakterystyk tribologicznych skojarzenia materiałowego: próbka z Chirulenu 1120 o średnicy trzpienia 5 mm współpracująca tarczą ze stopu Vitalium. Badania przeprowadzono w roztworze Ringera. Pozostałe parametry testów były następujące: prędkość poślizgu – 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 m/s; nacisk – 0,5 MPa, 1 MPa; droga tarcia 1000 m; średnica tarcia – 25 mm; temperatura otoczenia $21 \pm 10^\circ\text{C}$; wilgotność względna powietrza podczas biegu badawczego $50 \pm 5\%$.

WYNIKI BADAŃ

Przykładowe fragmenty charakterystyk tribologicznych dla tarczy z celowo zwiększonym biciem osiowym do wartości $43 \mu\text{m}$ (wartość zalecana to mniej niż $10 \mu\text{m}$) i dla prędkości obrotowej 10 obr/min przedstawiono na **Rys. 4**. Analizując uzyskane charakterystyki dla układu z wyzwalaniem w funkcji czasu (**Rys. 4b**) widać, że dla ustawienia częstotliwości próbkowania 20 Hz otrzymujemy pełną informację o zniekształceniach tarczy (falistości) i nałożonych na nią dodatkowo przemieszczeniach, spowodowanych osiowym biciem wrzeciona i przeciwpróbki. Zmiany przemieszczeń liniowych powierzchni styku nie są bez znaczenia dla wartości siły tarcia, która jest skorelowana z charakterystyką położenia powierzchni styku. Zmiana wartości siły tarcia w czasie jednego obrotu dochodziła do wartości 0,08 N.



Rys. 4. Przykład fragmentu charakterystyki tribologicznej dla: a) systemu wyzwalania w punkcie, b) pomiaru ciągłego z częstotliwością 20 Hz

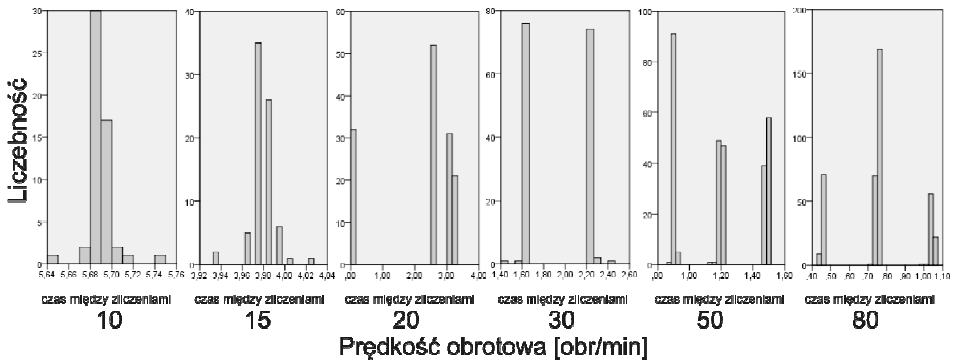
Fig. 4. A part of the tribological characteristics for: a) measurement triggered by position detector point, b) continuous measurement for 20 Hz sampling frequency

Uzyskane dla układu wyzwalania w punkcie charakterystyki nie zostały zakłócone przez bicie osiowe (**Rys. 4a**). Zastosowany układ wykazywał cechy filtra dolnoprzepustowego, który oddzielił zmiany cykliczne sygnału charakterystyk tribologicznych od rzeczywistego stanu węzła. Niewielkie fluktuacje sygnału przemieszczeń liniowych były spowodowane rozdzielczością czujnika i niewielkimi różnicami między czasami sygnału wyzwalania (**Rys. 5**).

W celu sprawdzenia poprawności systemu wyzwalania, przeanalizowano czasy między kolejnymi próbkowaniami i przedstawiono w postaci histogramów (**Rys. 5**). Z przedstawionych rozkładów wynika, iż system wyzwalania w punkcie działa poprawnie w zakresie prędkości obrotowych od 2 do około 15 obr/min. Minimalna prędkość jest ograniczona przez układ pomiarowy, który oczekuje maksymalnie 30 s na sygnał wyzwalania. Dla prędkości obrotowej 20 i 30 obr/min rejestrowane są już dwa piki na histogramie, co świadczy o problemach z prędkością przesyłania danych układu między komputerem a wzmacniaczem pomiarowym Spider 8. Dalszy wzrost prędkości zwiększa ilość pików do trzech.

Dalsze pomiary realizowano dla prędkości 76, 152, 228 i 304 obr/min. W przypadku najmniejszej prędkości, podobnie jak dla prędkości 80 obr/min pierwszej serii badań, występują trzy wartości czasów między pomiarami. W większości histogramów środkowy pik jest związany z czasem jednego obrotu wrzeciona. Pozostałe harmoniczne są w takiej samej odległości od właściwego piku i mają bardzo zbliżoną liczebność (**Rys. 5**). Skrócenia i wydłużenia czasu między pomiarami są spowodowane najprawdopodobniej przez sposób realizacji zbierania, przetwarzania i przesyłania danych.

Korzyści z zastosowania systemu wyzwalania w funkcji obrotu wrzeciona uwidaczniają się w monecie analizowania wartości siły tarcia (**Rys. 6a**). Analizowano wartość siły tarcia po ustabilizowaniu się tego parametru. Uzyskane z badań wartości wskazują jednoznacznie na bardzo dużą stabilność siły tarcia

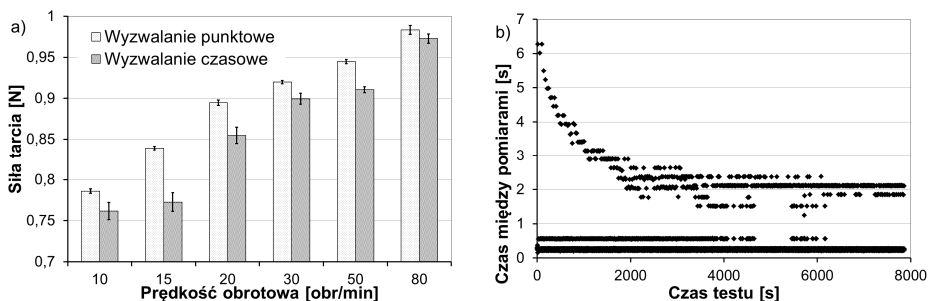


Rys. 5. Histogramy okresów między pomiarami

Fig. 5. Histograms of the periods between the measurements

w trakcie pomiarów dla badanego systemu, co przedstawiają odchylenia standardowe zamieszczone w postaci słupków błędów. Dopiero dla prędkości 80 obr/min zakłócenia spowodowane opóźnieniami w wyzwaniu i transmisji danych powodują, że różnice między systemami zbierania danych są mało istotne. Większa wartość średnia siły tarcia rejestrowana przy użyciu systemu wyzwalanego w funkcji obrotu wrzeczona spowodowana jest położeniem punktu wyzwania na obwodzie wrzeczona, który może zostać ustalony w czasie montażu przeciwpróbki.

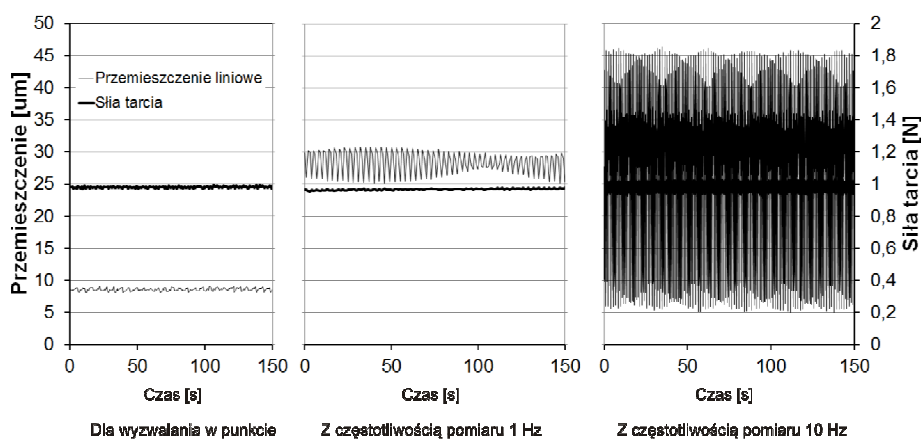
System wyzwania w funkcji obrotu wrzeczona nie daje stabilnych wyników przy dużo większych prędkościach obrotowych, jakie przeprowadzono w drugiej fazie badań. Przekroczenie prędkości obrotowej 80 obr/min powoduje zwiększenie ilości pików czasu między pomiarami, prowadząc do utraty informacji, gdy czas ten zwiększa się powyżej kilku sekund. Efekty takie obserwowane są dla badań przeprowadzanych dla prędkości powyżej 228 obr/min (Rys. 6b). Zmiany wartości obciążenia węzła tarcia, z 5 N na 10 N, nie wpłynęły znacząco na jakość wyników uzyskiwanych za pomocą obu systemów pomiarowych.



Rys. 6. Siła tarcia w funkcji prędkości obrotowej (a), czas między pomiarami w funkcji czasu testu (b), 228 obr/min, 5 N

Fig. 6. The friction force as a function of rotational speed (a); the time between measurements as a function of test time (b), 228 rpm, 5 N

Należy też podkreślić, że pomiary wykonywane za pomocą systemu wyzwalającego w funkcji czasu są obciążone zakłóceniami spowodowanymi dużo mniejszą częstotliwością próbkowania niż częstotliwość obrotów wężła. Bazując na literaturze związanej z teorią sygnałów [L. 8] można powiedzieć, że ustawienie częstotliwości próbkowania na 1 lub 2 Hz jest wartością niewystarczającą by móc się jednoznacznie wypowiedzieć na temat zmian charakterystyki zużyciowej, rejestrowanej za pomocą czujnika przemieszczeń (Rys. 7). Rejestrowana charakterystyka może dawać błędne wyniki o wartości przemieszczeń i bicia w danym zakresie czasu pomiaru.



Rys. 7. Fragmenty testów dla systemu wyzwalania w punkcie oraz systemu wyzwalania czasem z częstotliwością 1 i 10 Hz; 80 obr/min

Fig. 7. Part of tribological characteristics of the system, triggering the release point and the system time with a frequency of 1 and 10 Hz, 80 rpm

WNIOSKI

Przedstawiona modyfikacja stanowiska tribologicznego rozszerza możliwości akwizycji danych pomiarowych. Układ zbierania danych pomiarowych w funkcji obrotów wrzeczona jest uzupełnieniem standardowego systemu zbierania wyników w funkcji czasu, w który standardowo wyposaża swoje stanowiska producent. System zbierania danych pomiarowych w funkcji obrotu wrzeczona umożliwia pomiary dla próbek, które wykazują przemieszczenia liniowe powierzchni współpracy większe niż zalecane w standardowym systemie pomiarowym.

Z przeprowadzonych badań wynika, że stosowanie zautomatyzowanego systemu wyzwalania pomiaru w funkcji położenia tarczy powala na znaczne zmniejszenie rozrzutu wyników pomiarów przy niskich prędkościach obrotowych (2÷80 obr/min, co dla promienia tarcia $r = 24$ mm daje prędkość liniową

od 0,005 do 0,2 m/s), a tym samym na poprawę powtarzalności i odtwarzalności badań tribologicznych w układzie kula–tarcza i trzpień–tarcza.

Podziękowania

Autorzy składają podziękowania dla Jerzego Lecha za pomoc w technicznej realizacji modernizacji stanowiska badawczego T-01M.

Praca naukowa wykonana w ramach realizacji Programu Strategicznego pn. „Innowacyjne systemy wspomagania technicznego zrównoważonego rozwoju gospodarki” w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka.

LITERATURA

1. Szczerek M., Wiśniewski M. (red.): Tribologia i tribotechnika. Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2000.
2. Szczerek M., Metodologiczne problemy systematyzacji eksperymentalnych badań tribologicznych. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 1997.
3. Jünemann H., Bewertung von Normen – eine zwingende Voraussetzung für ihre sinnvolle Anwendung, in Normen und Spezifikationen für Schmierstoffe und Kraftstoffe. Conference Compendium, Esslingen 1992.
4. Szczerek M., Potekha V., Piekoszewski W., Badanie cieplno-żuźyciowych charakterystyk ślizgowego skojarzenia stal-polimer. Tribologia nr 3, 1993, s. 63–66.
5. Bara M., Duda P., Kaptacz S., Odporność zuźyciowa tworzyw konstrukcyjnych współpracujących z powłoką tlenkową. Tribologia nr 4, 2011, s. 21–32.
6. Duda P., Bara M., Kaptacz S., Ocena odporności zuźyciowej tworzyw polimerowych we współpracy z powłoką tlenkową. Tribologia, 2010, t. 232, s. 77–85.
7. Instrukcja obsługi Zestaw Tribologiczny T-01M typu trzpień–tarcza. ITeE – PIB w Radomiu, 2008.
8. Izydorczyk J., Płonka G., Tyma G., Teoria sygnałów. Helion, Gliwice 2006.

Summary

When conducting tribological model studies with the aim of achieving a high repeatability and reproducibility of results, much attention is paid to the precise setting of test parameters. Most of all, setting the sliding speed and normal load is made with great care. Ambient conditions (temperature, humidity) are also controlled. At the same time, issues related to inaccuracy in making samples are often marginalized. Inaccuracies in surface geometric texture and shape are often caused by additional technological processes carried out after a precise execution of the sample base. This often increases the axial and radial run-out of samples. Moreover, it may lead to a misinterpretation of the measurement of linear wear intensity and friction.

In order to eliminate the impact of the axial run-out on the measurement of linear wear intensity, the authors have developed a concept as well as designed and built an automated computer-controlled system of triggering the measurement of tribological characteristics as a function of a disc position, which is no longer as a function of time.

This system was applied in the system of the T-01M produced by ITeE – PIB Radom. The modified system was tested on two types of material combinations and with a high variability of the speed of the node. In addition, the results of tribological characteristics obtained with a standard measuring system triggered with time were compared with those obtained using the developed system.

The study shows that the use of an automated system of triggering measurement as a function of a disc position enables a considerable decrease in scattering measurement results at low engine speeds, thereby improving repeatability and reproducibility of tribological studies in the system ball-on-disc and pin-on-disc.

