

Jerzy TARNOWSKI*, **Wacław GAWĘDZKI****,
Dariusz LEPIARCZYK*

BADANIA PROCESU TARCIA KINETYCZNEGO W CIERNYCH SKOJARZENIACH ŻELIWO–STAL

INVESTIGATIONS OF THE PROCESS OF KINETIC FRICTION IN FRICTIONAL PAIRS CAST IRON–STEEL

Słowa kluczowe:

stanowisko badawcze, metodyka badawcza, tory pomiarowe, skojarzenie cierne, charakterystyki tarciove

Key words:

test stand, test procedure, measurement lines, frictional pairs, friction characteristics

Streszczenie

W artykule przedstawiono przeprowadzone badania tribologiczne wybranego skojarzenia żeliwo–stal. Zaprezentowano w tym celu zbudowane stanowisko badawcze oraz jego oprzyrządowanie pomiarowe. Scharak-

* Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel. (012) 617 31 25, e-mail: tarnow@agh.edu.pl

** Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Metrologii, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, (012) 617 28 28, e-mail: waga@agh.edu.pl

ryzowano sposób przygotowania próbek do badań oraz przeprowadzone eksperymenty badawcze. Omówiono zastosowaną oryginalną metodykę badań sprowadzającą się do pomiaru momentu skręcającego, przemieszczenia kąowego jako drogi tarcia i siły docisku próbki. Umożliwiło to wyznaczenie pozostałych parametrów i charakterystyk badanego procesu tarcia. Zamieszczono wyniki oraz przykłady uzyskanych z badań charakterystyk tarciovych. Sprecyzowano sposób wyznaczania wartości kinetycznego i statycznego współczynnika tarcia dla badanego skojarzenia żeliwo–stal.

WPROWADZENIE

Omawiane w pracy badania tribologiczne dotyczą bardzo istotnych i powszechnie występujących w światowej problematyce naukowej i technicznej problemów współpracy skojarzeń ciernych [L. 1, 3]. Prace objęte tą problematyką poświęcają wiele uwagi węzłom konstrukcyjnym maszyn i urządzeń, takim jak: sprzęgła, hamulce oraz łożyskowania ślizgowe [L. 2, 3, 4]. W budowie takich podzespołów często współpracującymi materiałami są żeliwo i stal. Znajomość charakterystyk tarcia w przypadku takich materiałów nie jest do końca znana. Szczególnie dotyczy to współpracy skojarzeń żeliwo–stal w stanie poślizgu, czyli warunków tarcia kinetycznego. W wyniku procesu tarcia skojarzonych materiałów i zachodzącego w określonych warunkach są zmiany wartości statycznego i kinetycznego współczynnika tarcia na powierzchniach stykowych. Udowodnieniu tak postawionej tezy towarzyszyło przeprowadzenie badań laboratoryjnych, mających na celu dostarczenie danych do konstrukcji i budowy węzłów tarcia pracujących w podobnych warunkach. Przed przystąpieniem do badań opracowano analityczny model współpracy ww. skojarzeń [L. 5], który poddano tu weryfikacji doświadczalnej. W tym celu zbudowano stanowisko badawcze i opracowano oryginalną metodykę dla przeprowadzonych eksperymentów.

CEL PRACY

Celem naukowym pracy była identyfikacja procesów tarcia zachodzących na współpracujących powierzchniach żeliwa i stali. Szczególnie dotyczyło to poznania zjawisk zachodzących po zerwaniu styku współpracujących powierzchni i zmiany tarcia spoczynkowego w tarcie kinetyczne. Dokonanie tego było możliwe przez pomiar i wyznaczenie charakterystyk

procesu tarcia skojarzonych próbek stalowych z żeliwną tarczą. Uzyskanie wartości statycznego współczynnika tarcia μ_s oraz kinetycznego współczynnika tarcia μ_k dla wybranego skojarzenia było jednym z użytecznych celów przeprowadzonych badań.

ZAŁOŻENIA I ZAKRES PROWADZONYCH BADAŃ

W badaniach przyjęto jako stałe następujące czynniki:

- rodzaj tarcia (tarcie ślizgowe technicznie suche),
- materiał przeciwpróbki stałej (tarcza żeliwna) i materiał próbki obrotowej (tarcza stalowa).

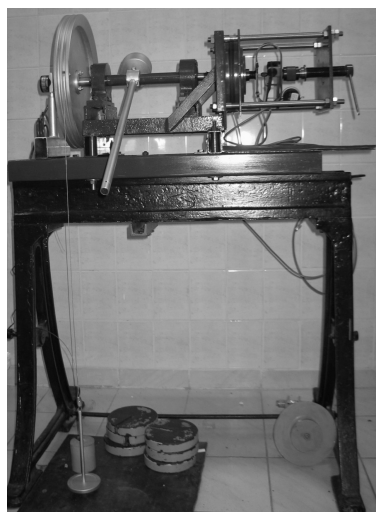
Jako zmienne stabilizowane przyjęto wartości obciążeń $F_L = 50\text{ N}$, 100 N , 150 N , zawieszane na krążku o stałym promieniu $R = 185\text{ mm}$).

Podczas wykonywania kolejnych doświadczeń dokonywano pomiaru następujących wielkości:

- siły docisku na powierzchniach trących badanych powierzchni F_D ,
- momentu tarcia występującego w strefie kontaktu M_T ,
- kąta obrotu tarczy ruchomej po zerwaniu styku $\alpha = 0$ do 270° .

OPIS STANOWISKA BADAWCZEGO

Widok ogólny stanowiska do badań tarcia kinetycznego w skojarzeniu stal–żeliwo przedstawiono na **Rys. 1**.



Rys. 1. Widok ogólny stanowiska do badań kinetycznego procesu tarcia
Fig. 1. General view of the test stand for investigation of kinetic friction process

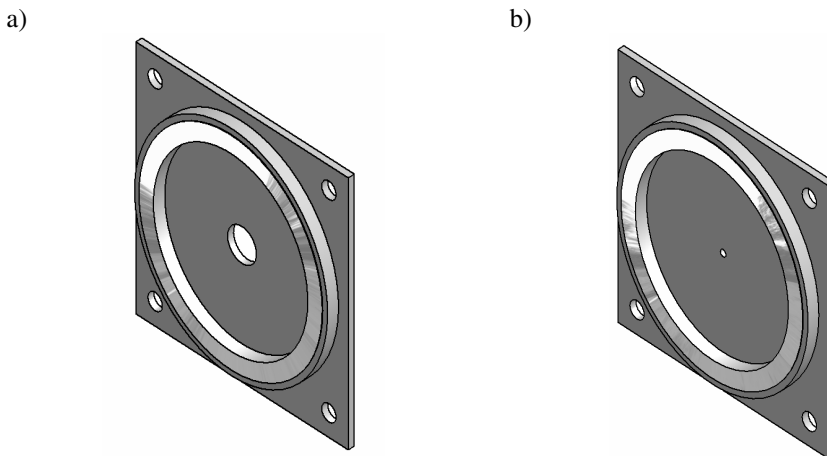
Dokładny opis oraz budowę jego podzespołów zamieszczono w pracy [L. 6], a w tym miejscu ograniczono się do scharakteryzowania zmian modernizacyjnych głowicy pomiarowej, wprowadzonych podczas badań wstępnych. Zaprojektowane i zbudowane stanowisko w Katedrze Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn oraz Katedrze Metrologii AGH jest objęte wnioskiem patentowym [L. 7], należącym do autorów tej publikacji.

Jeden pełny cykl doświadczenia składał się z następujących kolejno realizowanych podstawowych czynności: zamocowanie na wale stanowiska stalowej próbki i wywołanie nacisku wstępnego na powierzchniach trących za pomocą mechanizmu śrubowego; obciążenie dźwigni przez podwieszenie ciężaru i powolne zwalnianie napięcia wstępnego, aż do chwili zerwania styku na powierzchniach badanych tarcz; rejestrowanie oraz zapis mierzonych wielkości i powtórzenie ww. czynności dla kolejnej wartości stabilizowanych obciążeń.

OPIS GŁOWICY BADAWCZEJ ZASTOSOWANEJ W BADANIACH

Zastosowaną w badaniach głowicę badawczą tworzyły trzy metalowe tarcze, które stanowiły przeciwpróbkę i próbkę powierzchni badanych.

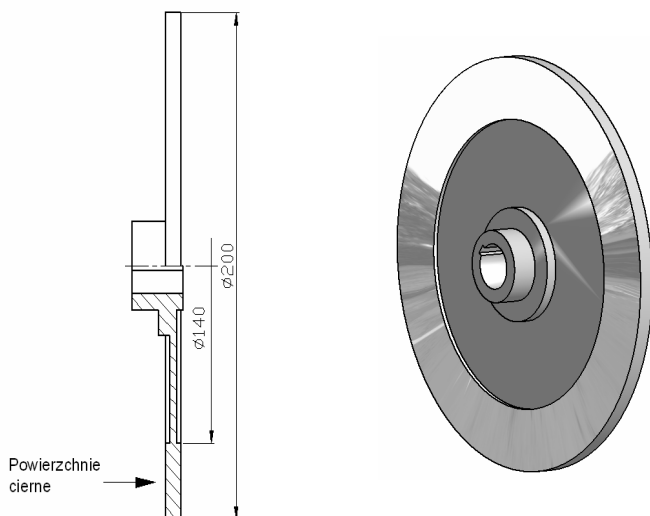
Użytkowana do doświadczeń przeciwpróbka zbudowana była z tarczy stałej (Rys. 2a) i przesuwnej (Rys. 2b).



Rys. 2. Tarcza stała (a) i przesuwna (b) jako przeciwpróbka w badaniach skojarzenia żeliwo–stal

Fig. 2. Stationary disc (a) and movable disc (b) as the countersample in tests of frictional pair cast iron–steel

Tarcza przesuwna posiadała zdolność wywierania regulowanego docisku, realizowanego za pomocą mechanizmu śrubowego. Obie tarcze wykonano z żeliwa EN-GJL-150, o wytrzymałości na rozciąganie $R_m = 150$ MPa i twardości $207 \div 211$ HB. Powierzchnie współpracujące z próbką poddano szlifowaniu, osiągając średnie arytmetyczne odchylenie profilu $R_a = 0,63$.



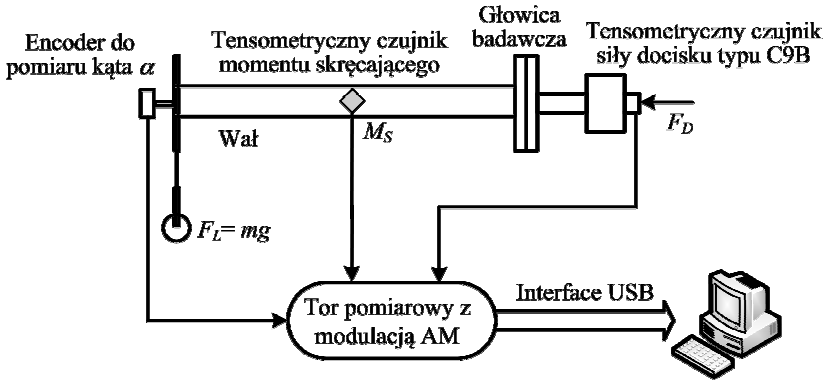
Rys. 3. Tarcza obrotowa jako próbka w badaniach procesów tarcia kinetycznego żeliwo–stal
Fig. 3. Rotational disc as the sample in tests of kinetic friction process cast iron–steel

Badania prowadzono na próbkach w kształcie tarczy i wymiarach przedstawionych na **Rys. 3**.

Próbka wykonana ze stali C45 o wytrzymałości na rozciąganie $R_m = 610$ MPa, $R_e = 360$ MPa, twardości $200 \div 205$ HB i następującym składzie chemicznym: C – 0,45%, Mn – 0,8%, Si – 0,37%. Stan powierzchni próbek zastosowanych do badań przyjmował średnie wartości równe $R_a = 0,63$.

OPIS UKŁADU POMIAROWEGO

W celu dokonania rejestracji wyników badań, a następnie wyznaczenia pozostałych parametrów współpracy ciernej, niezbędne jest wyposażenie stanowiska w zainstalowany układ pomiarowy przedstawionym na **Rys. 4**.



Rys. 4. Schemat torów pomiarowych na stanowisku do badania tarcia dla skojarzenia żeliwo–stal

Fig. 4. Scheme of measurement lines in the stand for tests in pair cast iron–steel

Przedstawiany układ pomiarowy składa się z enkodera do pomiaru kąta obrotu wału α , stanowiący pierwszy tor pomiarowy, tensometrycznego czujnika momentu skręcającego wał M_S , stanowiący drugi tor pomiarowy oraz czujnika siły docisku tarcz ciernych F_D jako trzeci tor pomiarowy. Sygnały z czujników pomiarowych przekazywane były do wzmacniacza pomiarowego typu Spider 8, a następnie przez interfejs USB do komputera, gdzie były zapisywane i przetwarzane. Szczegóły związane z budową układu pomiarowego oraz parametry zastosowanych w nich czujników pomiarowych zamieszczono w pracy [L. 7].

Innowacyjne rozwiązanie zastosowanego układu pomiarowego umożliwia równoczesny pomiar w funkcji czasu trzech wielkości: siły docisku $F_D(t)$, momentu skręcającego wał $M_S(t)$ i kąta położenia wału $\alpha(t)$. Otrzymane dane z torów pomiarowych pozwalają na wyznaczenie momentu tarcia $M_T(t)$, prędkości kątovej $\omega(t)$ oraz współczynników tarcia statycznego i kinetycznego dla skojarzeń żeliwo–stal.

Bilans działających momentów wyraża następujące równanie:

$$I \frac{d\omega}{dt} = M_{OBC} - M_S - M_T \quad (1)$$

gdzie: I – moment bezwładności obracającego się układu.

Podczas eksperymentu, początkowo prędkość kątovej układu tarcz była zerowa, a siła docisku tarcz F_D , a z nią wartość momentu tarcia M_T

były zmniejszane stopniowo aż do momentu, gdy zrównały się wartości momentów po prawej stronie równości (1), tzn.:

$$M_T = M_{OBC} - M_S \quad (2)$$

Dalsze niewielkie zmniejszenie siły docisku powodowało zmniejszenie momentu tarcia i rozpoczęcie obrotu tarcz. Moment tarcia statycznego zastępowany był przez mniejszy moment tarcia kinetycznego (mniejsza wartość współczynnika tarcia kinetycznego przy tej samej wartości siły docisku). Fakt ten powodował, że układ tarcz zaczynał obracać się z niezerowym przyśpieszeniem (prędkość kątowna rosła – **Rys. 6c**). Wartość współczynnika tarcia statycznego wyznaczana jest dla chwili czasu, w której rozpoczyna się ruch z zależności:

$$\mu_S = \frac{F_{TS}}{F_D} = \frac{M_{OBC}}{R_{sr}} = \frac{m \cdot g \cdot R}{R_{sr} \cdot F_D} \quad (3)$$

natomiast współczynnik tarcia kinetycznego z zależności:

$$\mu_K = \frac{F_{TK}}{F_D} = \frac{M_{OBC} - M_S}{R_{sr} \cdot F_D} = \frac{m \cdot g \cdot R - M_S}{R_{sr} \cdot F_D} \quad (4)$$

Zależność (4) obowiązuje tylko w początkowym okresie obrotu tarcz, gdzie można przyjąć stałą wartość prędkości kątowej ω (**Rys. 5c i 6c**). Dalszy przebieg rejestracji wskazuje na wzrost prędkości kątowej, czyli stałe przyśpieszenie kątowe i wówczas moment tarcia kinetycznego M_T musi być wyznaczany na podstawie pełnego bilansu momentów wyrażonego przez zależność (1).

WYNIKI I PODSUMOWANIE BADAŃ

Wyniki uzyskane z badań tworzą dwie grupy parametrów, które pochodzą bezpośrednio z pomiarów na stanowisku oraz wyznaczone i obliczone na podstawie pomiarów. Do grupy pierwszej należy zaliczyć następujące parametry: moment skracający M_S , siła docisku próbki i przeciwpróbki F_D , przemieszczenie kątowe jako droga tarcia próbki α .

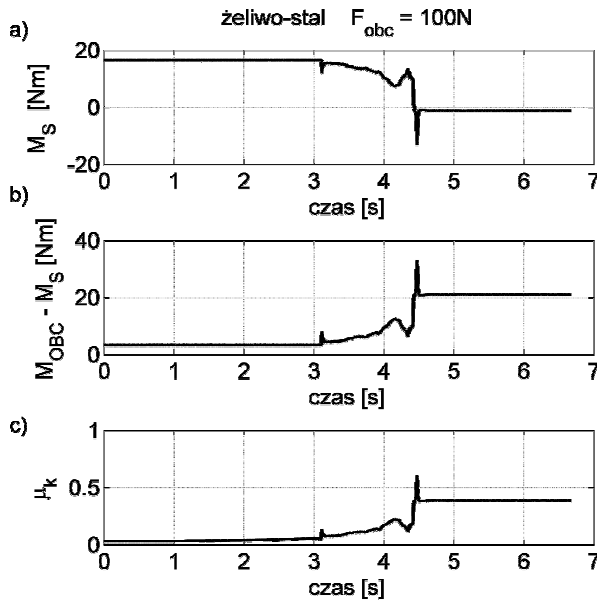
W grupie parametrów wyznaczonych i obliczonych można wyróżnić: moment tarcia badanego skojarzenia M_T , siłę tarcia statycznego F_{ST} , prędkość kątową próbki względem przeciwróbki ω , współczynnik tarcia statycznego μ_S oraz współczynnik tarcia kinetycznego μ_K . Wszystkie wyniki otrzymane z pomiarów i obliczeń zamieszczono w **Tabeli 1**.

Tabela 1. Wyniki badań tarcia w skojarzeniu ciernym żeliwo–stal

Table 1. Results of friction tests In frictional pair cast iron–steel

Nr. eksp.	F_L [N]	Parametry zmierzone			Parametry wyznaczone				
		F_D [N]	M_S [Nm]	α [°]	F_{ST} [N]	M_O-M_S [Nm]	ω [rad/s]	μ_S	μ_K
1	50	360	7-4	20÷270	209	3÷6	0÷10	0,25	0,05÷0,21
2		600	7-3	20÷270	174	3÷7	0÷10	0,30	0,09÷0,21
3		520	7-3	20÷270	161	3÷7	0÷10	0,33	0,1÷0,21
4		375	7-3	20÷270	130	3÷7	0÷10	0,40	0,18÷0,3
5		370	7-2	20÷270	192	2÷7	0÷10	0,27	0,1÷0,21
6	100	600	15-7	20÷270	334	2÷11	0÷14	0,32	0,05÷0,2
7		555	13-7	20÷270	268	5÷12	0÷15	0,39	0,1÷0,25
8		475	14-6	20÷270	280	4÷13	0÷10	0,38	0,09÷0,25
9	150	670	21-10	20÷270	431	5÷17	0÷10	0,37	0,09÷0,25
10		750	25-11	20÷270	425	5÷16	0÷10	0,37	0,1÷0,21

Badania procesów tarcia wybranego skojarzenia żeliwo–stal przeprowadzono dla obciążeń zewnętrznych w zakresie 50÷150 N oraz prędkości kątowych równych $\omega = 0\div 15$ rad/s. Dobór parametrów sterowanych przyjęto w oparciu o występujące wartości tych parametrów w rzeczywistych węzłach tarciovych, np.: hamulce tarczowe oraz taśmowe. Dla tak przyjętych obciążeń zewnętrznych wykonano dziesięć eksperymentów, w tym dla $F_L = 50$ N dokonano pięciu eksperymentów, dla $F_L = 100$ N – trzy i dla $F_L = 150$ N przeprowadzono dwa doświadczenia. Promień koła, na którym zawieszono były ww. ciężary był stały i wynosił 185 mm. Podwieszono ciężary powodowały powstanie momentów $M_{OBC} = f(F_L)$ o wartościach równych odpowiednio 9,25 Nm, 18,5 Nm oraz 27,75 Nm. Momenty obciążające M_{OBC} generowały powstanie w wale stanowiska zmiennych wartości momentu skręcającego M_S , którego przykładowy przebieg $M_S = f(t)$ dla obciążenia zewnętrznego $F_L = 100$ N, przedstawiono na **Rys. 5a**.

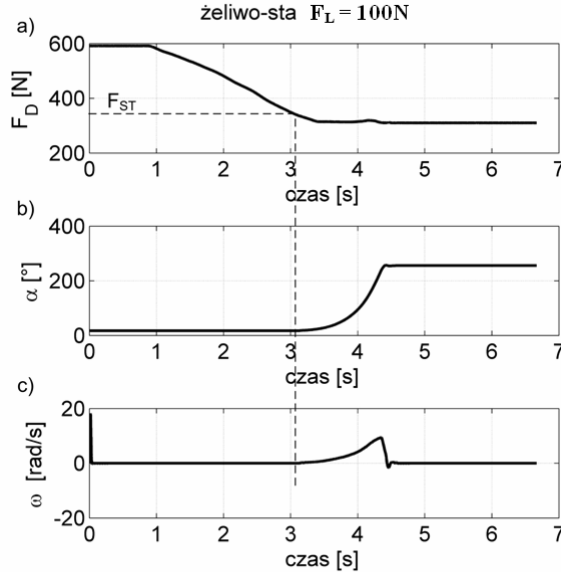


Rys. 5. Przykład wyników badania ciernego skojarzenia żeliwo–stal dla obciążenia, $F_L = 100\text{ N}$: a) charakterystyka zmian mierzonego momentu skręcającego na wale stanowiska, $M_S = f(t)$; b) przebieg zmian momentu tarcia stalowej próbki i żeliwnej przeciwpróbki w badanym procesie tarcia, $M_T = f(t)$; c) wartości kinetycznego współczynnika tarcia dla skojarzenia żeliwo–stal, $\mu_K = f(t)$

Fig. 5. The example of results of tests frictional pair cast iron–steel for load $F_L = 100\text{ N}$: a) Characteristics of variability of the shaft torsion moment, $M_S = f(t)$; b) Variability of the friction torque of the steel sample and cast iron counter sample in the friction process, $M_T = f(t)$, c) Values of the kinetic friction coefficient for the pair cast iron–steel, $\mu_K = f(t)$

Mierzony w trakcie dokonywania eksperymentów badawczych i zarejestrowany moment M_S pozwolił na wyznaczenie przebiegu momentu tarcia $M_T = f(t)$ dla początkowego fragmentu rejestracji, gdy można przyjąć, że prędkość kątowna jest stała, oraz uzyskanie wykresu zmian wartości kinetycznego współczynnika tarcia $\mu_K = f(t)$ dla badanego skojarzenia. Sposób wyznaczania tych parametrów przedstawiono w pracy [L. 7]. W badanym skojarzeniu żeliwa i stali uwidacznia się ścisła zależność pomiędzy momentami M_S i M_T . Przykładowy przebieg zmian prędkości ω , wyznaczony jako pochodna przemieszczenia kątownego α przedstawiono na wykresie **Rys. 6b** i **6c**. We wszystkich eksperymentach badań skojarzenia żeliwa i stali zaobserwowano jednoczesny wzrost kinetycznego

współczynnika tarcia μ_K ze wzrostem prędkości kątowej próbki. W tym czasie wartość siły docisku próbki i przeciwpróbki nieznacznie spadała.



Rys. 6. Wyniki badania ciernego skojarzenia żeliwo–stal dla obciążenia, $F_L = 100$ N: a) wykres zmian siły docisku próbki i przeciwpróbki w czasie badanym, $F_D = f(t)$; b) wykres kąta przemieszczenia ciężaru F_L jako drogi tarcia próbki względem przeciwpróbki, $\alpha = f(t)$; c) przebieg zmian prędkości kątowej próbki względem przeciwpróbki w czasie eksperymentu, $\omega = f(t)$

Fig. 6. Results of tests of frictional pair cast iron-steel for load $F_L = 100$ N: a) Diagram of variability of the pressing load of sample and countersample in the test period, $F_D = f(t)$, b) Diagram of the movement angle of the load F_L as the friction path of the sample in relation to countersample, c) Variability of the angle velocity of the sample in relation to countersample in experiment, $\omega = f(t)$

Dominujące znaczenie wpływu prędkości względnej ω na wzrost μ_K zarejestrowano dla maksymalnej prędkości $\omega = 0,15$ rad/s, przy której kinetyczny współczynnik tarcia osiągnął wartość maksymalną $\mu_K = 0,25$. Również w tych samych warunkach, przy obciążeniu $F_L = 100$ N, zanotowano jedną z najwyższych wartości współczynnika tarcia statycznego $\mu_S = 0,29$. Sposób wyznaczania statycznego współczynnika tarcia przedstawiono na **Rys. 6**. Jego wartość została zarejestrowana w chwili, w której wystąpił ruch próbki względem przeciwpróbki. Z tego punktu dla prędkości początkowej ω poprowadzono pionową linię kreskową do

przecięcia z wykresem siły dociskającej F_D . Wartość rzędnej dla punktu uzyskanego z przecięcia linii kreskowej i $F_D = f(t)$, jest równa wartości maksymalnej siły tarcia, oznaczonej na wykresie jako F_{ST} . Wyznaczony dla tej wartości siły statyczny współczynnik tarcia μ_S , określa stan przejścia ze spoczynkowego procesu tarcia w tarcie kinetyczne. Uzyskana w ten sposób charakterystyka tarcia pozwala na bardzo precyzyjne określenie statycznej nośności tarcia skojarzenia. Stanowi ją maksymalna wartość momentu skręcającego M_S , jaki może przenosić skojarzenie w podobnych warunkach pracy.

WNIOSKI

Uzyskane z badań charakterystyki badanego procesu tarcia, stanowią cenną bazę danych dla projektowania i budowy węzłów tarciovych wykonanych z żeliwa i stali. Dostarczają wielu parametrów wykorzystywanych w konstrukcjach hamulców tarczowych i taśmowych. Szczególnie istotnymi są wartości wyznaczonych współczynników tarcia statycznego i kinetycznego oraz nośności tribologicznej skojarzenia, stanowiącej maksymalną wartość przenoszonego momentu skręcającego. Do wniosków o istotnym znaczeniu, sformułowanych na podstawie przeprowadzonych badań, jest wyznaczenie charakterystyk zmian wartości kinetycznego współczynnika tarcia w funkcji prędkości ślizgania. Daje to obraz pracy hamulca lub sprzęgła w warunkach pracy przy poślizgu i przy całkowitym sprzężeniu współpracujących elementów.

Przeprowadzone badania i otrzymane wyniki badań mogą być wykorzystane w doborze materiałów ciernych przy projektowaniu, budowie i eksploatacji tribologicznych skojarzeń ciernych.

LITERATURA

1. Szczerek M., Wiśniewski M.: Tribologia i Tribotechnika. Wydawnictwo: Zakład Poligrafii Instytutu Technologii i Eksploatacji. Radom 2000.
2. Tsybul'nik A.P.: Hydraulic Friction Clutch for Centrifuge Drives. Chemical and Petroleum Engineering Volume: 38, Issue: 9–10, September 2002, pp. 501–504.
3. Marklund P.; Larsson R.: Wet clutch friction characteristics obtained from simplified pin on disc test. Tribology International Volume: 41, Issue: 9–10, September, 2008, pp. 824–830.

4. Nyman P.; Mäki R.; Olsson R.; Ganemi B.: Influence of surface topography on friction characteristics in wet clutch applications. *Wear* Volume: 261, Issue: 1, July 20, 2006, pp. 46–52.
5. Lepiarczyk D., Tarnowski J., Gawędzki W.: Stanowisko do badania statycznego i kinetycznego współczynnika tarcia skojarzeń ciernych. *Tribologia: teoria i praktyka*, 2009 r. 40 nr 6, s. 69–79.
6. Lepiarczyk D., Tarnowski J., Gawędzki W.: Urządzenie do badania tarcia i sprzężeń ciernych w sprzęgłach i hamulcach tarczowych. Zgłoszenie patentowe nr P-389 649, Urząd Patentowy RP 2009.
7. Lepiarczyk D., Tarnowski J., Gawędzki W.: Eksperymentalne wyznaczenie współczynnika tarcia statycznego i kinetycznego w skojarzeniu stal–ferodo. *Materiały INSYCONT 2010* (w druku).

Recenzent:
Jan WULCZYŃSKI

Summary

The paper presents tribological tests of the pair cast iron-steel. The structure of the test stand and measurement equipment is presented. The method of sample preparation and experiments are described. The original procedure has been applied in tests based on measurement of the torsion moment and the angle movement as the friction path and the pressure load on the sample. It made it possible to determine other parameters and characteristics of the friction process. Results and examples of friction characteristics are presented.