

Antoni JANKOWSKI, Stanisław F. ŚCIESZKA

ZNACZENIE I SPOSÓB WYZNACZANIA CHARAKTERYSTYK TARCIA STATYCZNEGO W HAMULCACH MASZYN WYCIĄGOWYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono stanowiska badawcze oraz opisano serię badań eksperymentalnych. Dzięki badaniom poznano charakterystyki tarcia statycznego wyselekcjonowanych materiałów ciernych. Wykazano, że charakterystyka tarcia statycznego jest pomocnym uzupełnieniem charakterystyk dynamicznych tarcia i że powinna być ona obowiązkową częścią kompleksowych badań materiałów ciernych.

IMPORTANCE AND METHOD OF TESTING OF STATIC FRICTION CHARACTERISTICS IN MINING WINDING BRAKES

Summary. In this paper the apparatus is presented and a series of experiments is described. The experiments reveal the static friction characteristics of some brake friction materials. It was proved that static friction characteristics is a useful supplement to dynamic friction testing and should be an obligatory part of every complex friction materials evaluation.

BEDEUTUNG UND BESTIMMUNGSWEISE DER CHARAKTERISTIKA STATISCHER REIBUNG IN BREMSEN VON AUFZUGMASCHINEN

Zusammenfassung. Im artikel wurden die Prüfstände dargestellt sowie eine Serie von Experimentaluntersuchungen beschrieben. Aufgrund dieser Untersuchungen wurden die Charakteristika statischer Reibung ausgewählter Reibstoffe erkannt. Es wurde nachgewiesen, dass die Charakteristik der statischen Reibung eine zusätzliche Ergänzung der dynamischen Reibung charakteristik ist. Es wäre zu empfehlen, dass sie zum festen Bestandteil von Komplexuntersuchungen der Reibstoffe wird.

1. WPROWADZENIE

Hamulce maszyn wyciągowych, podobnie jak hamulce w dźwignicach, windach lub pojazdach kołowych mają do spełnienia dwie główne funkcje. Pierwsza to redukcja prędkości lub całkowite zatrzymanie części ruchomych urządzenia oraz druga, równie ważna funkcja, to utrzymanie naczyń wyciągowych w pozycji nieruchomej w czasie ich za- i wyładunku. O ile pierwsza funkcja znalazła odbicie w wielu badaniach charakterystyk tarcia kinetycznego dla systemu tribologicznego okładzina hamulca - bieżnia hamulcowa, to funkcja hamulca trzymającego i znaczenie dokładnego wyznaczenia współczynnika tarcia statycznego dopiero niedawno zostały właściwie rozpoznane [1, 12].

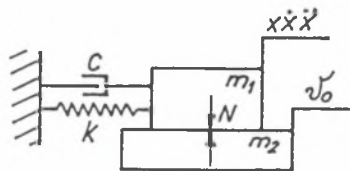
Innym czynnikiem podkreślającym znaczenie charakterystyk tarcia statycznego jest fakt, że generowanie drgań samowzbudnych w hamulcach uwarunkowane jest szczególnie cechami charakterystyki tarcia statycznego i kinetycznego systemu trybologicznego [2]. W technice znanych jest wiele układów samowzbudnych, jak np. drgania elementów obrabiarek, hamulców. Niezawodność i sprawność pracy hamulców, w szczególności w maszynach roboczych, związana jest w dużej mierze z dynamiką współpracy elementów ciernych. Niestabilna praca węzłów tarcia, wynikająca z faktu wystąpienia drgań samowzbudnych, prowadzi do zmniejszenia ich trwałości i jest źródłem hałasu. Przyjmowano wiele hipotez, wyjaśniających mechanizm ich powstawania. Obecnie uważa się, że powstają one w ciernych układach sprężysto - bezwładnościowych, w których współczynnik tarcia statycznego

zależy od długo trwałości nieruchomego styku [5] i jest większy od współczynnika tarcia kinetycznego, a także gdy zależność współczynnika tarcia kinetycznego od prędkości ma w pewnym zakresie jej wartości charakter malejący [2, 5, 6].

W procesie konstruowania węzłów tarcia (np. hamulców) ważne jest między innymi takie dobranie materiałów na elementy cierne, w których charakterystyce tribologicznej będą uwzględniane ww. hipotezy, czyli należy dążyć do wyselekcjonowania pary materiałów o takiej statycznej i kinetycznej charakterystyce tarcia, które w danych warunkach współpracy i dla określonych własności sprężysto-bezwładnościowych układu nie wywołują drgań samowzbudnych. Charakterystykę sprzężenia ciernego reprezentuje funkcja:

$$\mu = \varphi(v, c_1, c_2, \dots, c_n), \quad (1)$$

gdzie: $v = x - v_0$ jest prędkością względną (rys. 1), a c_1, \dots, c_n są czynnikami wpływającymi na własności tribologiczne sprzężenia ciernego, jak np.: temperatura, nacisk, czas trwania i prędkość narastania stycznego obciążenia, własności fizyczno-mechaniczne materiałów, własności fizyczne i mikrogeometryczne powierzchni itd. [2, 5].



Rys. 1. Schemat układu mechanicznego ze sprzężeniem ciernym:

m_1, m_2 - masy ciał,
 N - nacisk,
 k - współczynnik sprężystości,
 c - współczynnik tłumienia wiskotycznego,
 v_0 - prędkość

Fig. 1. Diagram of a mechanical system with the frictional coupling:

m_1, m_2 - mass,
 N - load,
 k - coefficient of elasticity,
 c - visco-dumping coefficient,
 v_0 - velocity

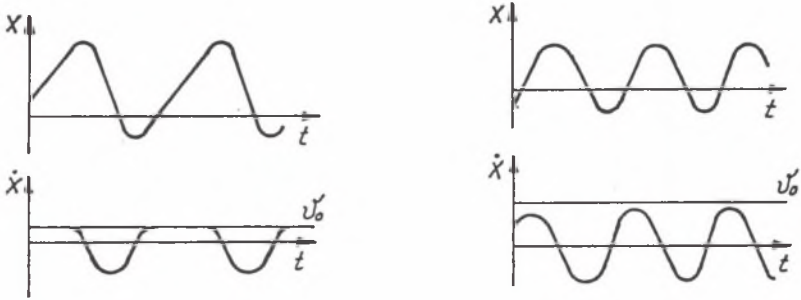
W układach ze sprzężeniem ciernym możliwe są dwa typy drgań samowzbudnych o różnym przebiegu i różnym źródle wymuszenia drgań [7, 8]:

- drgania relaksacyjne (ruch stick-slip); warunek takiego ruchu:

$$|\dot{x}|_{\max} \geq v_0 \quad (2)$$

- drgania harmoniczne lub prawie harmoniczne (rys.2); dla takiego ruchu zawsze spełniony jest warunek

$$\dot{x} < v_0 \quad (3)$$

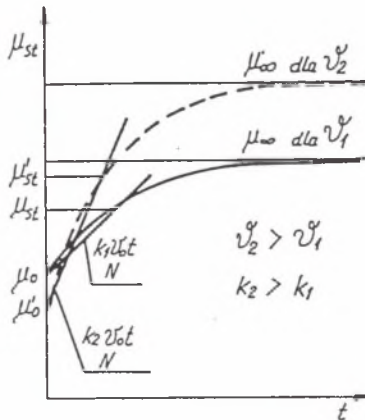


Rys. 2. Przebiegi zmian przemieszczeń i prędkości ciał:

- a - w ruchu przerywanym (stick-slip), w którym prędkość względna ciał $v=x-v_0$ osiąga wartość zero,
- b - w ruchu harmonicznym, w którym prędkość względna ciał nie osiąga wartości zero

Fig. 2. Displacement and velocity of the masses:

- a - for stick-slip movement, when relative velocity $v=x-v_0$ reach zero,
- b - for harmonic movement, when relative velocity $v=x-v_0 \neq 0$



Rys. 3. Zależność współczynnika tarcia statycznego μ_{st} od temperatury ϑ i czasu nieruchomego styku (statyczna charakterystyka tarcia)

Fig. 3. Relation between coefficient of static friction μ_{st} and temperature ϑ and duration of static contact (static characteristic of friction)

Charakter i przebieg drgań zależy od sprężystości układu ciernego, prędkości ruchu v_0 , fizycznych własności trących się powierzchni, np. własności reologicznych stref styku, w których występują naprężenia aż do granicy płynięcia materiału. Duży wpływ na drgania relaksacyjne wywiera temperatura powierzchni, wpływając na statyczną i kinetyczną charakterystykę tarcia (rys.3). Względna prędkość ruchu elementów ciernych w czasie drgań samowzbudnych $v = x - v_0$ może osiągnąć dużą wartość, powodując lokalny wzrost temperatury na rzeczywistych powierzchniach styku i zmianę wartości współczynnika tarcia kinetycznego.

Równanie ruchu dla układu przedstawionego na rys.1 można zapisać w postaci:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + N\Delta\mu = 0, \quad (4)$$

gdzie:

$$\Delta\mu = \mu_{st} - \mu_0 \quad (5)$$

Rozwiązanie równania (4) można napisać w postaci [7]:

$$X_{(t)} = \frac{N\Delta\mu}{k} + A \exp\left(-\frac{c}{2m}t\right) \sin(\omega t + \psi), \quad (6)$$

gdzie:

$$A = \left[\left(\frac{N\Delta\mu}{k} \right)^2 + \left(\frac{v}{\omega} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (8)$$

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{\dot{\omega}N\Delta\mu}{kv} \quad (9)$$

Warunek stabilności dynamicznej układu [7] można przedstawić za pomocą nierówności:

$$c > \frac{N\Delta\mu}{2\Gamma\sqrt{kmv_0^2}} \quad (10)$$

Ze wzorów (6) i (7) wynika, że dla określonych parametrów dynamicznych układu oraz warunków tarcia to, czy drgania wystąpią (oraz ich amplituda), zależą od wartości $\Delta\mu = \mu_{st} - \mu_0$. Wartość ta, charakterystyczna dla danej pary cierniej, jest ocenowym

kryterium pobudliwości sprzężenia ciernego do relaksacyjnych drgań samowzbudnych. O wartości $\Delta\mu$ decyduje oprócz statycznej charakterystyki tarcia (μ_{st}) także kinetyczna charakterystyka tarcia (wartość μ_v w okresie względnego ruchu ciał). Wartość μ_0 można uważać za współczynnik tarcia kinetycznego dla prędkości dążącej do zera lub współczynnik tarcia statycznego dla czasu nieruchomego styku $t = 0$.

W wielu badaniach wykazano zależność współczynnika tarcia określonej pary od prędkości ślizgania [6, 9, 10]. Eksperymentalne wyniki pomiarów współczynnika tarcia w funkcji prędkości (na stanowisku modelowym) można z wystarczającą dokładnością aproksymować krzywymi drugiego stopnia:

$$\mu_{(v)} = \mu_0 - \alpha v + \beta v^2, \quad (11)$$

gdzie:

- $\mu_{(v)}$ - kinetyczny współczynnik tarcia,
- v^* - prędkość względna, (rys.4), dla której:

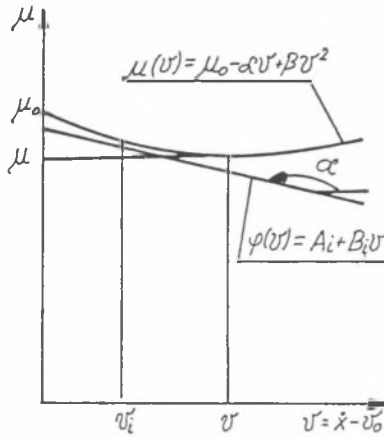
$$\begin{aligned} \mu_{(v^*)} &= \mu^* \\ \alpha &= \frac{2(\mu_0 - \mu^*)}{v} \\ \beta &= \frac{\mu_0 - \mu^*}{v^{*2}} \end{aligned} \quad (12)$$

Ponieważ w charakterystyce sprzężenia ciernego, z punktu widzenia inicjowania drgań, najważniejsze jest nachylenie krzywej $\mu_{(v)}$ [2], wygodniej jest analizować styczną dla bieżącej wartości prędkości v_i niż krzywą charakterystyki współczynnika tarcia kinetycznego. Równanie takiej stycznej ma postać (rys.4):

$$\varphi_{(v)} = A_i + B_i v, \quad (13)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} A_i &= \mu(v_i) - v_i \mu'(v_i) \\ B_i &= \mu'(v_i) \\ \mu(v_i) &= \text{tg } \alpha \end{aligned} \quad (14)$$



Rys. 4. Zależność współczynnika tarcia kinetycznego od prędkości względnego ruchu ciał v (kinetyczna charakterystyka tarcia)

Fig. 4. Relation between kinetic coefficient of friction and relative velocity v , (kinetic characteristic of friction)

Dynamiczne równanie ruchu dla układu przedstawionego na rys.1, z charakterystyką sprzężenia ciernego, częściowo liniową, opisaną wzorem (13), ma postać:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + N\varphi(v) = 0 \quad (15)$$

Wznosząca się ze wzrostem prędkości względnej charakterystyka sprzężenia ciernego $|B| > 0$ wyklucza powstawanie drgań samowzbudnych; w układzie powstają drgania samowzbudne, jeżeli $N|B| \geq c$ [2].

2. METODYKA BADAŃ

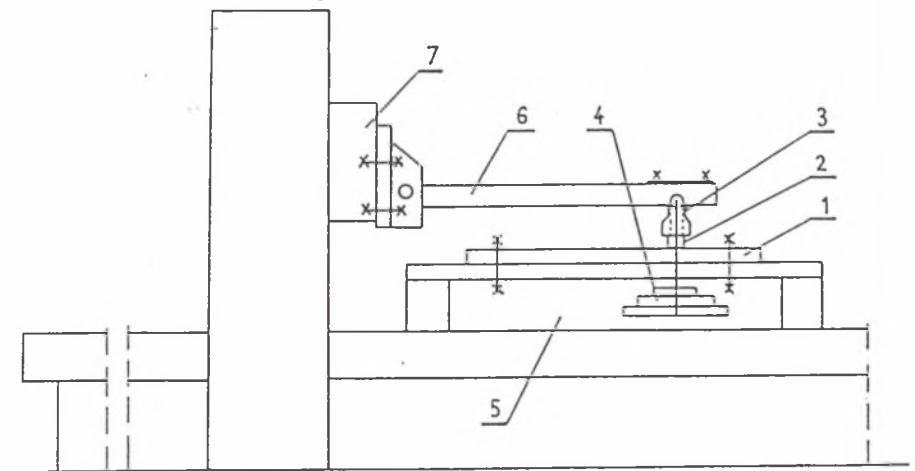
Tribologiczna weryfikacja hamulcowych tworzyw ciernych powinna obejmować dwie części:

- badania statycznej charakterystyki tarcia tworzyw ciernych, czyli badania w warunkach ruchu przerywanego (stick-slip),

- badania kinetycznej charakterystyki tarcia tworzyw ciernych na modelowych stanowiskach badawczych.

W tym artykule omówiono pierwszą część badań. Celem badań była ocena statycznej charakterystyki tarcia (μ_{st} , μ_o , $\Delta\mu$) dla wybranych tworzyw ciernych w warunkach ruchu stick-slip, dla różnych prędkości v_o , temperatury powierzchni tarcia ϑ , nacisków jednostkowych p , współczynników sprężystości k i czasów nieruchomego styku t . Badania przeprowadzono na trzech stanowiskach:

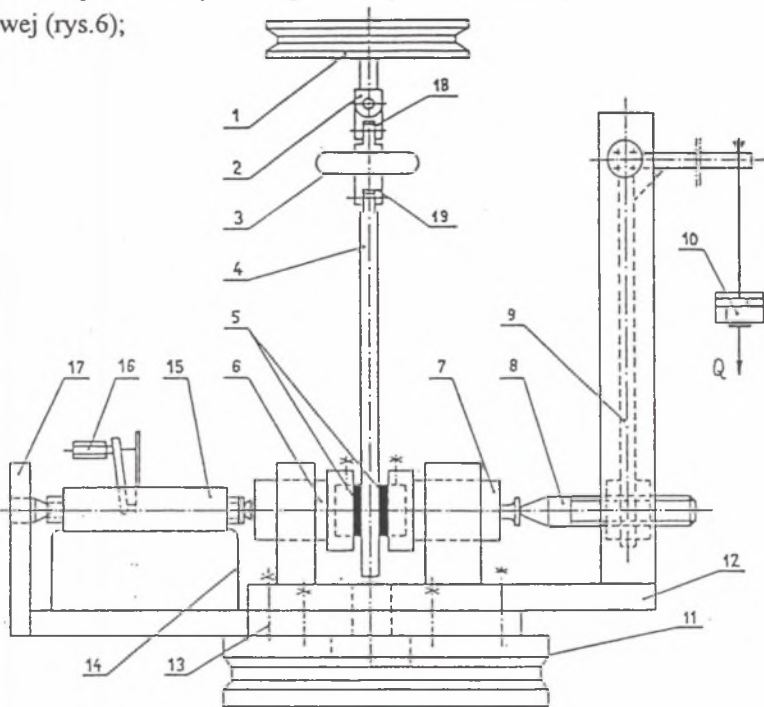
- 1 - adaptowanej do tego celu strugarce podłużnej bramowej (rys.5) [1, 11].
- Wyposażenie stanowiska w czasie badań składało się z zespołu aparatury i przyrządów do ciągłego pomiaru i rejestracji siły tarcia. Próbki wykonane z tworzyw ciernych miały kształt sześciianu o powierzchni tarcia 1 cm^2 . Przewidziana, w formie płaskiej szlifowanej płyty ze stali St5, przytwierdzona była do stołu strugarki i posiadała elementy grzejne;



Rys. 5. Stanowisko do badania tarcia statycznego zbudowane na strugarce podłużnej:
 1,2 - badane materiały,
 3 - czujnik tensometryczny,
 4 - obciążniki,
 5 - stół strugarki,
 6 - ramię,
 7 - suport

Fig. 5. Diagram of the apparatus used for static friction testing fitted on double-housing planer:
 1,2 - material tested,
 3 - strain gauge,
 4 - load,
 5 - planer table,
 6 - arm,
 7 - slide

2 - adaptowanej maszynie do badań wytrzymałościowych firmy "Instron" wyposażonej w uchwyt o regulowanej sile docisku próbek do przeciwpółki stalowej (rys.6);



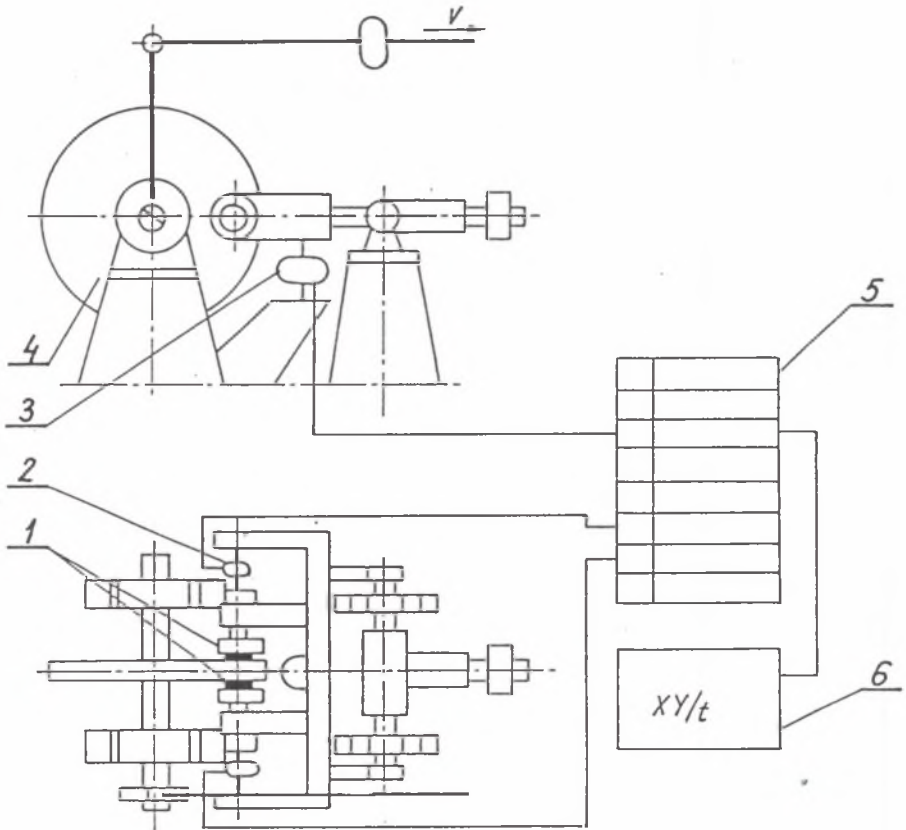
Rys. 6. Schemat stanowiska badawczego:

- 1 - głowica pomiarowa,
- 2 - uchwyt kabłąka,
- 3 - element sprężysty (kabłąk),
- 4 - przeciwpółka stalowa,
- 5 - próbki,
- 6,7 - tłoczki z gniazdami na mocowanie próbek,
- 8 - bolec dociskowy,
- 9 - dźwignia,
- 10 - ciężar,
- 11 - belka ruchoma maszyny,
- 12 - podstawa przyrządu,
- 13 - śruba mocująca,
- 14 - podstawa siłomierza,
- 15 - siłomierz kabłąkowy,
- 16 - czujnik zegarowy,
- 17 - belka oporowa,
- 18 - przegub górny,
- 19 - przegub dolny

Fig. 6. Diagram of the apparatus:

- 1 - measuring head,
- 2 - holder,
- 3 - bow,
- 4 - steel sample,
- 5 - specimen,
- 6,7 - specimen holders
- 8 - pressure pad,
- 9 - lever,
- 10 - load,
- 11 - cross-beam
- 12 - base of apparatus,
- 13 - force gauge,
- 14 - base of gauge,
- 15 - adjusting screw,
- 16 - dial indicator,
- 17 - fender beam,
- 18 - upper lever,
- 19 - bottom lever

3 - specjalnie do tego celu skonstruowanym stanowisku badawczym (rys.7), będący modelem fizycznym hamulca tarczowego maszyny wyciągowej. Badania współczynnika tarcia statycznego były realizowane dla tego samego układu próbka - przeciwpróbka co badania charakterystyk kinetycznych, lecz przy użyciu dodatkowego napędu tarczy z elementem sprężystym (rys.7).

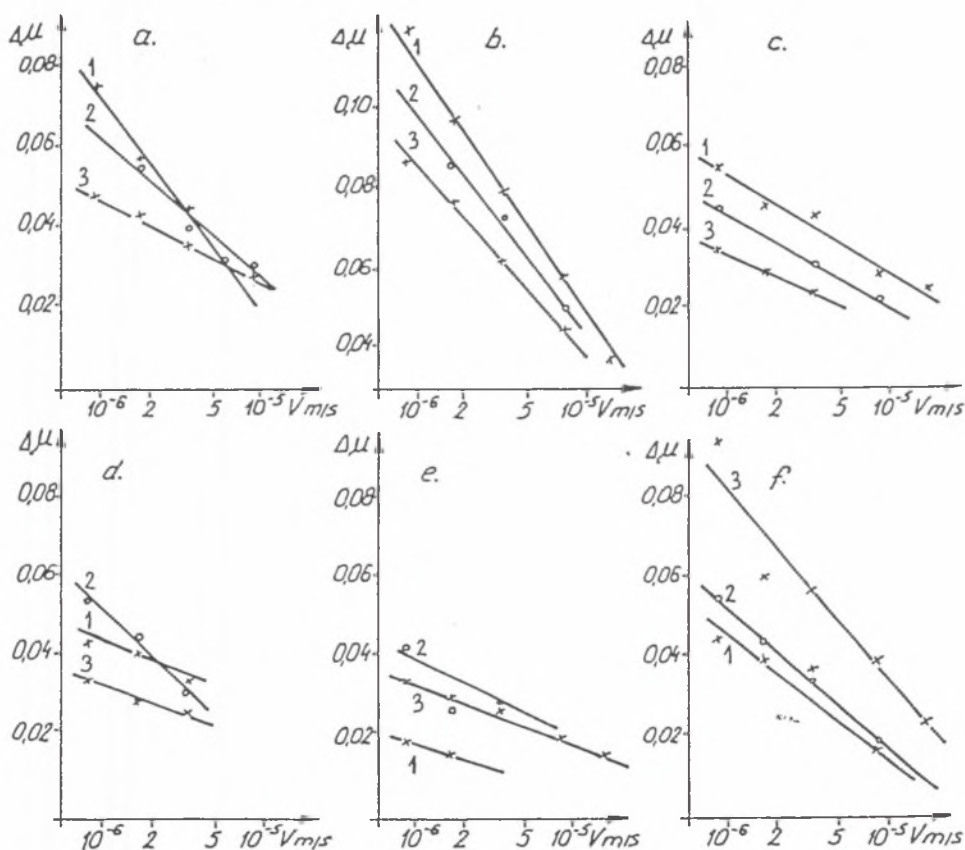


Rys. 7. Schemat stanowiska i aparatura pomiarowa do badań statycznych:
 1 - próbki,
 2 - siłomierz do pomiaru siły nacisku,
 3 - siłomierz do pomiaru siły tarcia,
 4 - tarcza hamulcowa,
 5 - centralny układ pomiarowy,
 6 - rejestrator XY-t

Fig. 7. Diagram of the apparatus for combine kinetic and static friction testing:
 1 - specimen,
 2 - normal force gauge,
 3 - friction force gauge,
 4 - brake disc,
 5 - strain gauge transducer,
 6 - recorder

3. OMÓWIENIE I ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ WSTĘPNYCH

Z badań otrzymano szereg oscylogramów, które wykazały, że tworzywa cierne mają różne statyczne charakterystyki tarcia. Przeliczone dla poszczególnych tworzyw ciernych wartości $\Delta\mu$ pozwalają na ich porównawczą klasyfikację pod względem skłonności do wywoływania ruchu stick-slip. Opracowane wyniki badań przedstawiono graficznie na rys. 8.



Rys. 8. Zmiany wartości $\Delta\mu$ dla wybranych tworzyw w funkcji prędkości v_0 i nacisków: $p_1=0,5$ MPa, $p_2=1,0$ MPa, $p_3=2,5$ MPa: a) tworzywo TW-1, b) tworzywo TW-2, c) tworzywo TW-3, d) tworzywo TW-4, e) tworzywo TW-5, f) tworzywo TW-6

Fig. 8. $\Delta\mu$ changes as a function of velocity v_0 and pressure: $p_1=0,5$ MPa, $p_2=1,0$ MPa, $p_3=2,5$ MPa: a) material TW-1, b) material TW-2, c) material TW-3, d) material TW-4, e) material TW-5, f) material TW-6

Badania wykazały, że wzrost obciążenia normalnego i temperatury powierzchni tarcia zwiększa prawdopodobieństwo drgań samowzbudnych. W tych warunkach rośnie dla większości tworzyw $\Delta\mu$, a przez to siła wymuszająca drgania $N\Delta\mu$. W większości eksperymentów siła potrzebna do pierwszego zerwania była największa, co wskazuje na zależność siły tarcia statycznego od czasu nieruchomego styku. Uzyskane zależności wskazują, że przyczyną zjawisk są:

- reologiczne własności strefy styku, na przykład pełzanie materiału,
- wzrost rzeczywistej powierzchni styku po przyłożeniu obciążającej siły stycznej,
- umocnienie strefy styku w wyniku działania naprężeń stycznych i normalnych,
- dyfuzja przez powierzchnię pierwotnego rozdziału,
- niszczenie ochronnych błon powierzchniowych w funkcji czasu,
- zmiany własności ciernych w funkcji temperatury na rzeczywistych powierzchniach styku.

W badaniach zaobserwowano duży wpływ obecności zanieczyszczeń na powierzchni stalowej przeciwpróbki oraz wpływ luzów i sposobu zamocowania próbek na przebieg zmian współczynnika tarcia, w związku z czym były one przygotowywane do badań ze szczególną starannością.

Wartości siły potrzebnej do pierwszego zerwania były większe od oporów tarcia kinetycznego dla małych prędkości, ale były istotnie mniejsze od oporów tarcia kinetycznego przy dużych prędkościach, charakterystycznych dla pracy hamulców. Wynika stąd konieczność badania i podawania dla tworzyw ciernych jako wielkość charakterystyczną wartość współczynnika tarcia statycznego w temperaturze otoczenia i wyższych. Przeprowadzone badania dały wystarczająco dobrą selektywność wyników, pozwalając na klasyfikację tworzyw z punktu widzenia statycznych charakterystyk tarcia. Wykazały one, że najmniejsze wartości $\Delta\mu$ uzyskano dla tworzyw TW-4, TW-5 i TW-3, a największe dla tworzyw TW-2, TW-1 i TW-6.

4. BADANIE WPŁYWU WYBRANYCH PARAMETRÓW NA WSPÓŁCZYNNIK TARCIA STATYCZNEGO HAMULCOWYCH PAR CIERNYCH

Podczas hamowania bezpieczeństwa najistotniejsze jest, aby współczynnik tarcia kinetycznego zachowywał stabilną wartość w miarę wzrostu temperatury powierzchni tarcia, będącą wynikiem wytracania energii, pochłaniania i rozpraszania jej przez

hamulec. Na ten temat napisano wiele prac, natomiast nie doceniono roli współczynnika tarcia statycznego, który ma wpływ na moment hamowania podczas postoju maszyny. Istotną rolę odgrywa tu także wpływ wzrostu temperatury na zmianę współczynnika tarcia statycznego.

Do czasu wykazania, że współczynnik tarcia statycznego jest mniejszy od współczynnika tarcia kinetycznego właściwego dla prędkości i temperatur charakterystycznych w pracy hamulca maszyny wyciągowej, zagadnienie zmian współczynnika tarcia statycznego nie znajdowało należytego odbicia w pracach badawczych. Kiedy w niektórych urządzeniach wyciągowych zaobserwowano niespełnianie kryterium statycznej pewności hamowania przy jednoczesnym spełnieniu wymogów dynamicznych, zaczęto doceniać różnicę pomiędzy tarcieniem statycznym i kinetycznym. Tym samym dostrzeżono brak należytego rozpoznania problemu współczynnika tarcia statycznego w hamulcowych parach ciemnych, co przyczyniło się do podjęcia prac badawczych nad tym zagadnieniem i właściwym jego rozpoznaniem [1, 12].

Z przeprowadzonej analizy literatury wynika, iż badania tarcia statycznego prowadziło wielu badaczy dla różnych skojarzeń, a także różnych warunków tarcia, jednak najczęściej dotyczących skojarzeń typu metal-metal. Najczęściej badano i opisywano empirycznie współczynnik tarcia statycznego w zależności od czasu trwania nieruchomego styku oraz od prędkości narastania stycznego obciążenia. Takie badania wraz z opisem empirycznym zjawiska tarcia statycznego zaprezentowali w swoich pracach Brockley, Rabinowicz, Derjaguin, Kato i inni [13, 14].

5. WYNIKI BADAŃ GŁÓWNYCH I ICH PODSUMOWANIE

Badania przeprowadzono na stanowisku opisanym w rozdz. 2 i pokazanym na rys.6, w warunkach przerywanego ruchu stick-slip. Próbkę do badań wykonano z trzech materiałów ciemnych FM-1, FM-2 i FM-3, aktualnie używanych w hamulcach maszyn wyciągowych. Skład chemiczny, własności fizyczne i mechaniczne próbek zostały opisane w pracy [1]. Przeciwpróbki wykonano z tej samej stali węglowej, jakiej używa się do budowy tarcz hamulcowych w maszynach wyciągowych. Przeciwpróbki wykonano w kilku wariantach obróbki mechanicznej powierzchni (poprzez polerowanie, szlifowanie, struganie, frezowanie), z uzyskaniem wysokości nierówności R_z od 0,9 do 36 μm . Do badań wpływu innych parametrów poza rodzajem

obróbki powierzchni używano przeciwpróbki szlifowanej i polerowanej o $R_z = 0,9 \mu\text{m}$, w której do zbadania wpływu zmian temperatury na współczynnik tarcia statycznego zabudowano wewnątrz element grzejny oraz czujnik umożliwiający ciągłą rejestrację temperatury na powierzchni tarcia. Badania prowadzono w następujących warunkach tarcia:

- czas trwania nieruchomego styku, $t = 3 \div 1250\text{s}$,
- prędkość narastania stycznego obciążenia

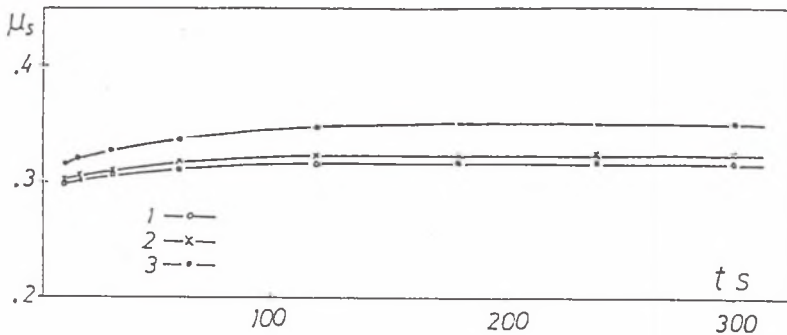
$$Q = 0,062 \div 12,4 \text{ N/s},$$
- wysokość nierówności na powierzchni przeciwpróbki

$$R_z = 0,9 \div 36,4 \mu\text{m},$$
- temperatura na powierzchni tarcia

$$T = 20 \div 300 \text{ }^\circ\text{C},$$
- naciski jednostkowe

$$p = 0,5 \div 2,0 \text{ MPa}.$$

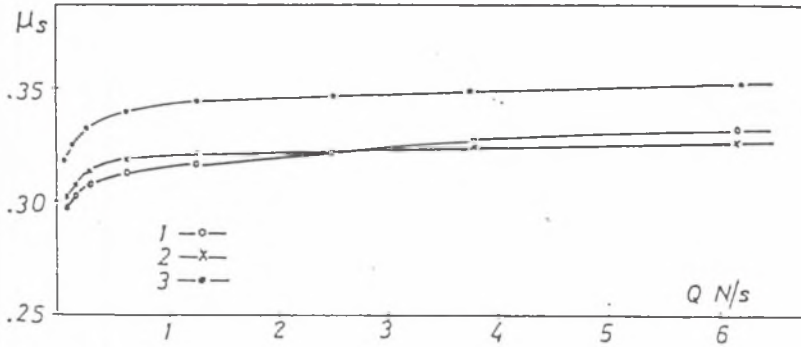
Wyniki badań wpływu czasu trwania nieruchomego styku, prędkości narastania stycznego obciążenia, stanu powierzchni tarcia, temperatury oraz nacisków jednostkowych na współczynnik tarcia statycznego przedstawiono na rys. 9÷14.



Rys. 9. Współczynnik tarcia statycznego w zależności od czasu trwania nieruchomego styku: $Q=0,2488 \text{ N/s}$, $R_z=0,9 \mu\text{m}$, $T=20 \text{ }^\circ\text{C}$, $p=1 \text{ MPa}$, 1 - FM1, 2 - FM2, 3 - FM3

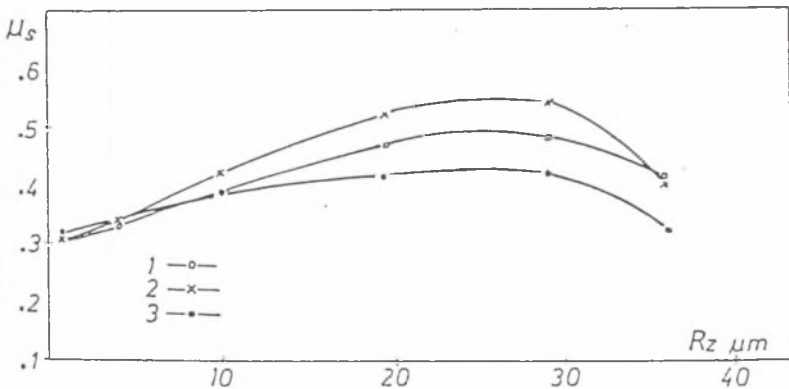
Fig. 9. Coefficient of static friction v.s. contact time: $Q=0,2488 \text{ N/s}$, $R_z=0,9 \mu\text{m}$, $T=20 \text{ }^\circ\text{C}$, $p=1 \text{ MPa}$, 1 - FM1, 2 - FM2, 3 - FM3

Badania wykazały, że współczynnik tarcia statycznego jest wieloparametrową funkcją. We wszystkich eksperymentach uzyskano wpływ czasu trwania nieruchomego styku na wzrost współczynnika tarcia (rys.8). Uzyskano wzrost μ_s w granicach $7 \div 15\%$ w relacji do wartości początkowej.



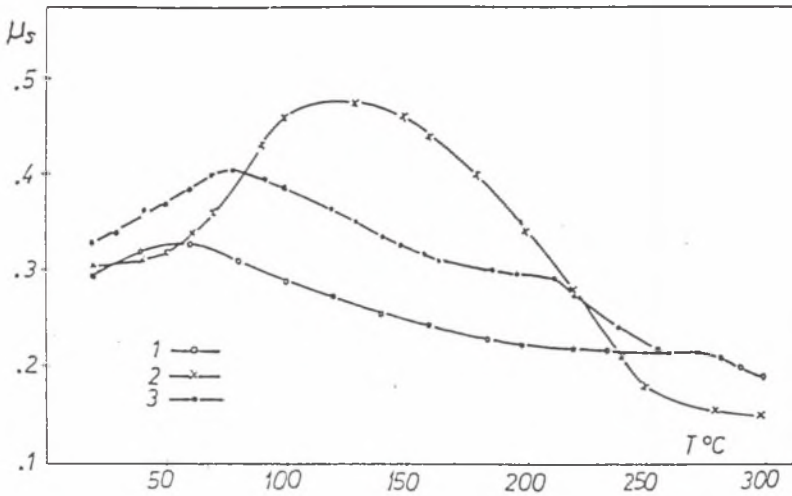
Rys. 10. Współczynnik tarcia statycznego w zależności od prędkości narastania stycznego obciążenia: $t=30$ s, $R_z=0,9$ μm , $T=20$ $^{\circ}\text{C}$, $p=1$ MPa, 1 - FM1, 2 - FM2, 3 - FM3

Fig. 10. Coefficient of static friction v.s. rate of tangential loading: $t=30$ s, $R_z=0,9$ μm , $T=20$ $^{\circ}\text{C}$, $p=1$ MPa, 1 - FM1, 2 - FM2, 3 - FM3



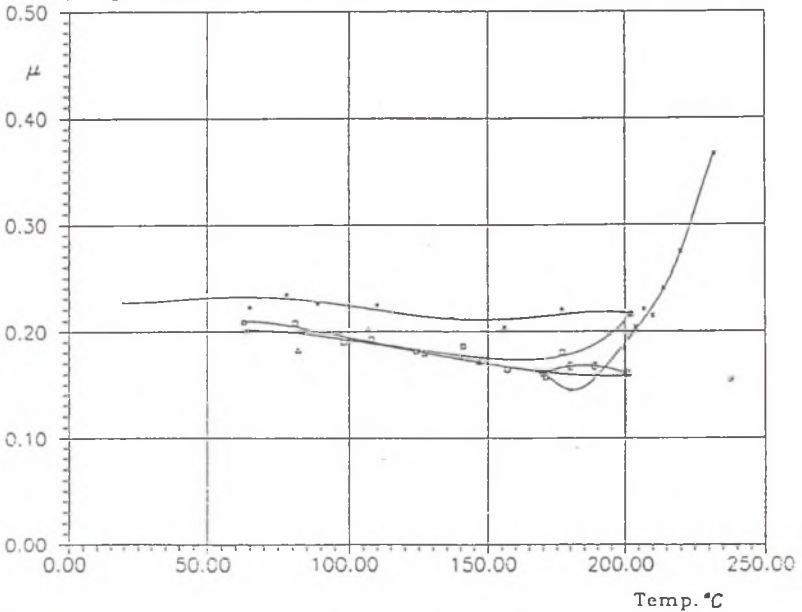
Rys. 11. Współczynnik tarcia statycznego w zależności od wysokości nierówności: $t=120$ s, $Q=0,2488$ N/s, $T=20$ $^{\circ}\text{C}$, $p=1$ MPa, 1 - FM1, 2 - FM2, 3 - FM3

Fig. 11. Coefficient of static friction v.s. counterspecimen roughness: $t=120$ s, $Q=0,2488$ N/s, $T=20$ $^{\circ}\text{C}$, $p=1$ MPa, 1 - FM1, 2 - FM2, 3 - FM3



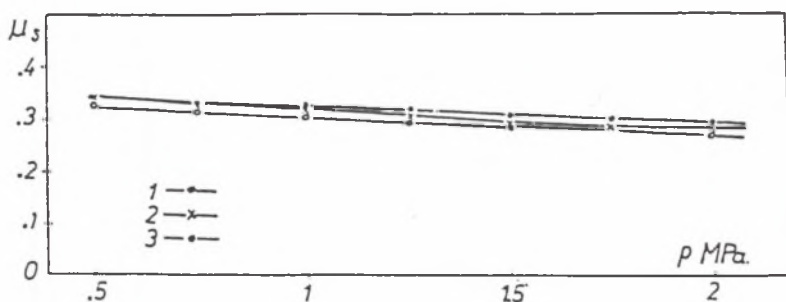
Rys. 12. Współczynnik tarcia statycznego w zależności od temperatury powierzchni tarcia: $t=120$ s, $Q=0,2488$ N/s, $R_z=0,9$ μ m, $p=1$ MPa, 1 - FM1, 2 - FM2, 3 - FM3

Fig. 12. Coefficient of static friction v.s. surface temperature: $t=120$ s, $Q=0,2488$ N/s, $R_z=0,9$ μ m, $p=1$ MPa, 1 - FM1, 2 - FM2, 3 - FM3



Rys. 13. Współczynnik tarcia statycznego w zależności od temperatury powierzchni tarcia: $t=120$ s, $Q=0,2488$ N/s, $R_z=0,9$ μ m, $p=1$ MPa, 1 - FMB1

Fig. 13. Coefficient of static friction v.s. surface temperature: $t=120$ s, $Q=0,2488$ N/s, $R_z=0,9$ μ m, $p=1$ MPa, friction material FMB1



Rys.14. Współczynnik tarcia statycznego w zależności od nacisków jednostkowych:
 $t=120$ s, $Q=0,2488$ N/s, $R_z=0,9$ μm , $T=20$ $^{\circ}\text{C}$, 1 - FM1, 2 - FM2, 3 - FM3

Fig. 14. Coefficient of static friction v.s. pressure: $t=120$ s, $Q=0,2488$ N/s, $R_z=0,9$ μm ,
 $T=20$ $^{\circ}\text{C}$, 1 - FM1, 2 - FM2, 3 - FM3

Zależność powyższą można przedstawić następującym równaniem:

$$\mu_s = \mu_0 + c_1 \frac{t}{t + c_2},$$

gdzie:

c_1 c_2 - stałe.

W przeciwieństwie do wcześniejszych publikacji [15, 16] wykazano wzrost współczynnika tarcia statycznego wraz ze wzrostem prędkości narastania stycznego obciążenia (rys. 10), którego przebieg jest zbliżony do przebiegu wpływu czasu trwania nieruchomego styku.

Wpływ sposobu obróbki powierzchni na współczynnik tarcia statycznego przedstawiono na rys. 11. Analiza wyników pomiarów wykazała, że ze wzrostem wysokości nierówności (R_z) rośnie współczynnik tarcia do pewnego punktu, a następnie dość gwałtownie maleje. Jest to właściwość charakterystyczna dla wszystkich badanych par ciemnych. W praktyce oznacza to, że docieranie i procesy formowania warstwy wierzchniej wpływają na tarcie statyczne.

Wpływ temperatury powierzchni na współczynnik tarcia statycznego okazał się różny dla każdego z badanych materiałów (rys. 12 i 13). Zmiany tarcia statycznego wraz ze zmianą temperatury były kontrolowane przez własności mechaniczne, plastyczne itp. i przez chemiczną degradację materiału w temperaturze powyżej temperatury krytycznej. W tych stosunkowo prostych eksperymentach istnieje możliwość wyznaczenia krytycznej temperatury dla dowolnego materiału ciemnego, w

której współczynnik tarcia statycznego spada poniżej lub rośnie powyżej (rys. 13) akceptowanego poziomu dla konkretnego zastosowania materiału ciernego.

Badanie charakterystyki tarcia statycznego dla potrzeb hamulców maszyn wyciągowych jest bardzo pożytecznym uzupełnieniem badań tarcia kinetycznego i powinien być obligatoryjną częścią wszystkich kompleksowych badań materiałów ciernych.

LITERATURA

- [1] Jankowski A.: Badanie procesów tarcia statycznego w hamulcach tarczowych górniczych maszyn wyciągowych. Praca doktorska, Gliwice 1991
- [2] Giergiel J., Bednarz S., Sędziwy S.: Wpływ sprzężeń ciernych na drgania układów mechanicznych. Zeszyty Naukowe AGH nr 18 (158), 1967
- [3] Ścieszka S.: Drgania samowzbudne w maszynowych węzłach tarcia. Biuletyn ZUT "Zgoda", 1974 nr 4
- [4] Ścieszka S.: Drgania samowzbudne wywołane tarciem suchym w hamulcach. Biuletyn OBRDiT Bytom, 1974 nr 1
- [5] Kragielskij J.W.: Trenie i iznos. „Maszynostrojenije”, Moskwa 1968
- [6] Basford P., Twiss S.: Properties of Friction Materials Trans. ASME, February 1958
- [7] Francia G.: Le vibrazioni autoccitate nell'attrito radente. ATA, 1959 nr 1
- [8] Le Suan An.: Eksperimentalnoje issledowanije mechaniczeskich awtokolebanii pri trenii. Mechanika Twierdogo Tiała, 1972 nr 4
- [9] Broś J., Czaplicki J., Ścieszka S.: Badania charakterystyk cierno-zużyciowych tworzyw hamulcowych w warunkach modelowych. ZEM PAN, z.4, 1975
- [10] Ścieszka S.: Problemy hamowania maszyn wyciągowych. Studium ważniejszych zjawisk tribologicznych w parze cierniej: tworzywo hamulcowe-stal. Praca habilitacyjna, Gliwice 1976
- [11] Ścieszka S.: Badania odporności materiałów hamulcowych na inicjowanie drgań samowzbudnych w procesie tarcia. Technika Smarownicza, 1975 nr 1
- [12] Ścieszka S., Jankowski A.: Static friction characteristics of brake couple of friction-impotence and methods of testing. Proceedings EUROTRIB'93, Budapeszt 1993

- [13] Kato S., Sato N., Matsubayashi T.: Some considerations on characteristics of static friction of machine tool slideway. Trans.ASME, J.Lubr.Technology 1972 vol.94
- [14] Richardson R.S., Nole H.: Surface friction under time-dependent loads. Wear 1976, 37
- [15] Johannes V., Green M., Brockley C.A.: The role of the rate of application of the tangential force in determining the static-friction coefficient. Wear 1973, 24,
- [16] Le Suan An.: Experimental testing of friction vibration. Mechanics of Solid, ANUSSR, 1972 Nr 4

Recenzent: Doc.dr inż. Tadeusz ZMYSŁOWSKI

Wpłynęło do Redakcji w lipcu 1994 r.

Abstract

Two basic function are essential for any friction brake in almost every mechanical system. The first function is to provide controled deceleration and the second, equally important function, is to keep mechacal systems in standstill position as long as it is required. The last function is particularly important in machines such as cranes, elevators and mining hoisting machines. The value of static friction forces are crucial in maintaining the rest position of the hoist mechanical system. The static friction forces in brakes on other hands are determined by coefficient of static friction and clamp forces on the brake shoes. Accurate estimation of the static friction coefficient for brake friction materials is a important part of the brake calculation and design procedure. Notion of the static friction coefficient in not always distinguished from coefficient of kinetic friction. The object of this paper was to establish a test procedure and an apparaturs for evalution of both, static and kinetic friction coefficient and for study a changes of the coefficients of static friction as function of technological factors and service parameters in defined friction brake arrangement.