

**Politechnika Warszawska**  
**Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych**  
**Instytut Podstaw Budowy Maszyn**  
**Laboratorium Podstaw Konstrukcji i Eksploatacji**  
**Maszyn**

**Ćwiczenie nr.10**

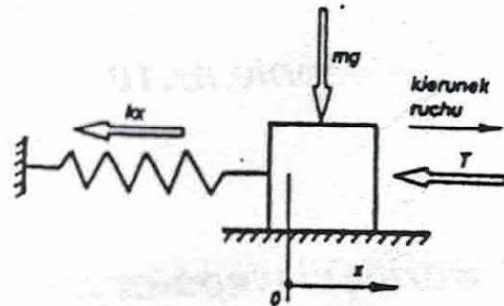
**Wyznaczanie wartości współczynników tarcia  
spoczynkowego i ruchowego materiałów ciernych  
stosowanych w konstrukcjach sprzęgieł i hamulców**

**Warszawa**

# 1. WPROWADZENIE

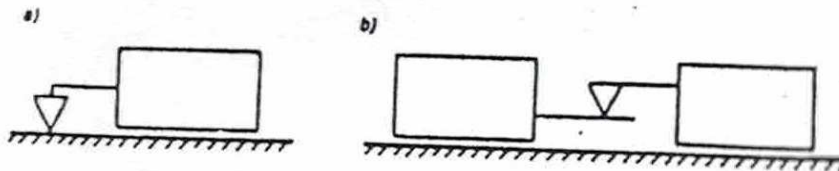
## 1.1 Pojęcie tarcia suchego

Zjawisko tarcia suchego występuje na słabo smarowanych lub nie smarowanych powierzchniach stykających się i przemieszczających się ciał. Klasyczny model układu z tarciem suchym, jaki analizowany jest w takich pozycjach literatury, jak [5,6,7,8] zilustrowany został na rys.1.



Rys.1

Występujące w tym przypadku zjawisko tarcia suchego powstaje pomiędzy podłożem i poruszającym się ciałem; symbolicznie taki przypadek tarcia suchego przedstawić można w postaci schematu przedstawionego na rysunku 2a.



Rys.2

Możliwe jest również występowanie zjawiska tarcia suchego pomiędzy przemieszczającymi się ciałami; ten przypadek występowania tarcia symbolizuje schemat przedstawiony na rysunku 2b.

## 1.2 Siły tarcia suchego

Opierając się na właściwościach fizycznych poczynić można następujące stwierdzenia dotyczące sił tarcia suchego:

-siła tarcia jest jednoznacznie określona wówczas, gdy prędkość względna stykających się ciał jest różna od zera,

-siła tarcia może osiągać różne wartości z ustalonego zbioru, gdy prędkość względna stykających się ciał jest równa zeru.

W przypadku pierwszym siła tarcia jest skierowana przeciwnie do prędkości wzajemnego przemieszczania się ciał (poślizgu), a jej wartość można wyznaczyć na podstawie funkcji  $T(x, \dot{x})$

W przypadku drugim, tzn. gdy wartość prędkości poślizgu jest równa zeru, wówczas jeżeli wartość przyspieszenia poślizgu jest różna od zera, to siła tarcia jest przeciwnie skierowana do przyspieszenia poślizgu, a jej wartość jest równa wartości sił tarcia statycznego, a więc  $T(x, 0)$ ; natomiast gdy wartość przyspieszenia jest zerowa, wówczas wartość siły tarcia nie przekroczy wartości sił tarcia statycznego.

Do opisu sił tarcia suchego [1], [2], [3] założmy, że położenie ciał, pomiędzy którymi występuje zjawisko tarcia, określa w każdej chwili kierunek działania tych sił.

Przyjmijmy, że kierunek działania siły wyznacza wektor  $H^T(t, x)$ , a dopuszczalne natężenie siły określa funkcja wielowartościowa o postaci:  $\theta(t, x, v)$  Przyjmując, że funkcja  $\theta$  określona jest następująco:

$$\theta(t, x, v) = \begin{cases} \{T_+(t, x, v)\} & \text{gdy } \mathcal{G}(t, x, v) > 0 \\ \{T_1(t, x, v), T_2(t, x, v)\}, & \text{gdy } \mathcal{G}(t, x, v) = 0 \\ \{T_-(t, x, v)\}, & \text{gdy } \mathcal{G}(t, x, v) < 0 \end{cases}$$

gdzie

$\theta$  -funkcja opisująca prędkość względną stykających się i przemieszczających się ciał;

$T_+$ ,  $T_-$  -funkcje (rys.3) określające natężenie siły tarcia kinematycznego, które powstaje, gdy  $\mathcal{G} \neq 0$ ,

$T_1$ ,  $T_2$  -funkcje (rys.4) opisujące wartości graniczne natężenia siły tarcia statycznego  $\theta = 0$ , siłę tarcia statycznego można przedstawić w postaci:

$$T = -H^T(t, x)p \\ p \in \theta(t, x, v)$$

W powyższym wzorze przyjęty znak "-" oznacza zwrot siły tarcia,  $H^T(t, x)$  oznacza wektor siły,  $p$  jest natężeniem siły tarcia z przedziału funkcji wielowartościowej odpowiadające zawsze badanemu stanowi układu, tzn.  $p \in (T_1, T_2)$

Wykorzystując właściwości fizyczne tarcia suchego, wymienionym funkcjom (Rys.3) przypisać można następujące cechy:

$$\begin{aligned} T_+ &> 0, \\ T_- &< 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_1 &> 0 \\ T_2 &< 0 \end{aligned}$$

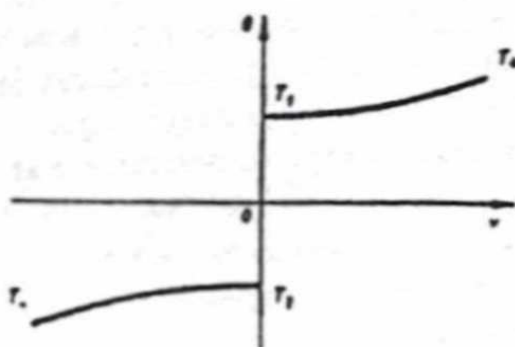
a także

$$\lim_{\vartheta \rightarrow 0^+} T_+ \leq T_1$$

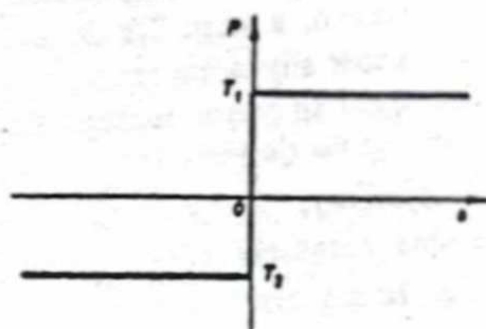
oraz

$$\lim_{\vartheta \rightarrow 0^-} T_- \geq T_2$$

Schematyczny wykres wielowartościowej funkcji  $\theta$  zilustrowany został na rysunku 3.



Rys.3



Rys.4

W przypadku, gdy prędkość wzajemnego przemieszczania stykających się ciał jest równa zero, a więc gdy

$$\theta = H^T v + \xi = 0$$

wtedy tarcie suche ogranicza ruch ciał utrzymując stan zerowej wartości poślizgu. W wyniku utrzymywania takiego stanu następuje ograniczenie przyspieszeń przemieszczających się ciał.

$$a = \frac{d\vartheta}{dt} = H^T w + h = 0$$

$$h = \dot{H}^T v + \dot{\xi}$$

- Występujące w powyższych wzorach wielkości oznaczają:
- w-uogólnioną wartość przyspieszenia względnego stykających się ciał,
- $H^T$  - wektor określający kierunek przyspieszenia,
- $\dot{\xi}$  - przyspieszenia ciał spoza układu mające wpływ na poślizg.

Ograniczenia ruchu opisane przytoczonymi wzorami występują wówczas, gdy natężenie siły tarcia (Rys.4) jest mniejsze od wartości granicznych, tzn. gdy

$$p \in (T_1, T_2)$$

W przypadku, gdy natężenie siły tarcia osiąga wartość graniczną, pomiędzy stykającymi się ciałami występuje poślizg i ruch nie jest ograniczony.

### 1.3 Charakterystyka materiałów ciernych stosowanych w konstrukcjach sprzęgieł i hamulców

Zasadnicze wymagania formułowane wobec nowych rozwiązań konstrukcyjnych materiałów ciernych dotyczą przede wszystkim warunku spełnienia przez nie, odpowiednio wysokich wymagań wytrzymałościowych, tarciovych i ekologicznych. Aktualne działania zmierzające do zapewnienia możliwie najwyższych parametrów w wymienionych grupach wymogów polegają głównie na:

- udoskonalaniu konstrukcji materiałów ciernych już istniejących,
- poszukiwaniu i tworzeniu nowych rozwiązań konstrukcyjnych materiałów na bazie komponentów powszechnie znanych i wykorzystywanych w produkcji masowej,
- tworzeniu konstrukcji elementów ciernych hamulców z materiałów o wysoko zaawansowanej technologii wytwarzania, takich jak np. materiały z węglików spiekanych, materiały kompozytowe i td..
- doborze składu komponentów materiału, który uzupełniony odpowiednio zaawansowanym procesem technologicznym wytwarzania, pozwoliłby na osiaganie w procesie hamowania, wysokich parametrów tarciovych,
- eliminacji z materiałów ciernych komponentów szkodliwych dla środowiska naturalnego.

Aktualnie, najczęściej wykorzystywanymi komponentami jakie stosowane są w konstrukcjach sprzęgieł i hamulców samochodów, a więc w produktach przemysłu, którego zapotrzebowanie na materiały cierne jest bardzo duże, są żywice syntetyczne, kauczuk syntetyczny oraz różnego rodzaju, najczęściej niemetaliczne wypełniacze. Składniki materiałów ciernych hamulców, stosowane w jednostkach kolejowych rozwijających średnie wielkości prędkości są bardzo podobne. Działania zmierzające do zwiększenia skuteczności działania hamulców wykonanych z tego typu materiałów polegają na udoskonalaniu wewnętrznej ich struktury i takim doborze komponentów, który zapewniłby możliwie wysoką wartość współczynników tarcia w możliwie szerokim zakresie zmian temperatury, wysoką odporność na naciski, wysoką pojemność cieplną, możliwie dobre warunki odprowadzania ciepła i td..

Ogromną rolę w tym zakresie odgrywa również proces technologiczny. Jego optymalny przebieg w znaczący sposób przyczynia się do poprawy praktycznie wszystkich parametrów tarciovych i eksploatacyjnych materiałów, a niektóre jego etapy, np. zabieg wygrzewania powierzchni klocków hamulcowych, w istotny sposób poprawia warunki bezpieczeństwa już w pierwszej fazie eksploatacji pojazdu.

Materiały cierne, które przeznaczone są do pracy w ekstremalnych warunkach obciążeń mechanicznych i temperaturowych, stosowane w najnowszych konstrukcjach hamulców, są najczęściej materiałami kompozytowymi lub spiekami. Tego typu materiały są powszechnie stosowane w konstrukcjach hamulców kół samolotów, samochodów wyścigowych oraz w hamulcach najszybszych pociągów.

Obok odpowiedniego składu komponentów materiałów ciernych ważnymi czynnikami mającymi wpływ na skuteczność i stabilność procesu hamowania są parametry cieplne pracy tworzących zestawy hamulcowe par ciernych. Optymalny przebieg procesu hamowania powinien być realizowany przy możliwie niskich temperaturach współpracujących ze sobą par ciernych. Dlatego dążenie konstruktorów układów hamulcowych do poprawy warunków odprowadzania ciepła z powierzchni hamulców jest jednym z ważniejszych problemów projektowych i badawczych.

W tym zakresie stosowane są dwa sposoby działań inżynierskich. Pierwszy polega na właściwym doborze i obróbce technologicznej materiału oraz na zastosowaniu w konstrukcjach hamulców wentylowanych tarcz hamulcowych. Powszechnie rozwiązania takie spotyka się w konstrukcjach motocyklowych i samochodowych. Spełniające podobne zadania rozwiązania stosowane w szybkich pociągach polegają na zastosowaniu podwójnych tarcz hamulcowych złączonych łopatkami, które spełniają rolę wentylatora.

Drugi sposób działań konstruktorskich to poszukiwanie możliwości odprowadzania dużych ilości ciepła z powierzchni materiałów ciernych hamulców. W tym zakresie powszechnie znanym sposobem jest stosowanie wzajemnie prostopadłych, równoległych lub promienistych szerokich nacięć materiału ciernego odpowiednio dla klocków i okładzin hamulcowych lub dla okładzin sprzęgieł. Jednym z interesujących rozwiązań wydaje się być konstrukcja klocka hamulcowego jaką zastosowano w najnowszym układzie hamulcowym pociągu TGV. W rozwiązaniu tym w miejsce jednolitego bloku materiału ciernego z prostokątnymi nacięciami powierzchni trącej wprowadzono do konstrukcji okładzinę cierną w postaci zespołu oddzielnych elementów walcowych. Dzięki temu znacznie powiększone zostały strefy umożliwiające dobre odprowadzanie ciepła z powierzchni pary cierniej.

Z inżynierskiego punktu widzenia dla rozwiązań konstrukcyjnych urządzeń hamulcowych najważniejsze znaczenie mają obciążenia mechaniczne i termiczne.

Każde opracowywanie nowych kompozycji materiałów ciernych wymaga przeprowadzenia wielokierunkowych i kompleksowych badań ich własności fizycznych i technicznych. Powinny one potwierdzać nie tylko fakt, iż nowe konstrukcje ciernych materiałów hamulcowych w zadowalającym stopniu spełniają określone dotychczas przynajmniej za wystarczające, wymogi bezpieczeństwa ale także wytyczać nowe kierunki badań zarówno eksperymentalnych jak i konstrukcyjnych zmierzające do podniesienia wartości osiąganych parametrów charakteryzujących te materiały.

## 2. CEL I METODYKA BADAŃ

### 2.1. Cel badań

Zasadniczym celem badań jest wyznaczenie wartości współczynników tarcia spoczynkowego i ruchowego wybranej grupy materiałów ciernych stosowanych w konstrukcjach sprzęgieł i hamulców.

Na pełną realizację tak sformułowanego celu pracy składają się działania etapowe podczas, których formułowane były precyzyjnie cele pośrednie z których najważniejszymi były między innymi:

- określenie składu fizycznego i chemicznego materiałów,
- wyznaczenie ich podstawowych parametrów technologicznych i wytrzymałościowych,
- określenie zasadniczych charakterystyk tarciovych oraz
- wyznaczenie i analiza zależności pomiędzy współczynnikami tarcia statycznego i dynamicznego w różnych przedziałach temperatur

## 2.2 Metodyka badawcza

Zakres prac badawczych dla realizacji sformułowanego powyżej celu pracy jest bardzo szeroki. Z konieczności ograniczymy go do dwóch materiałów ciernych przyjmując za kryterium kwalifikujące materiał do badań, jego reprezentatywność ze względu na rodzaj pojazdu w jakim jest stosowany, a więc: samochody powszechnego użytku osobowe lub ciężarowe, transport kolejowy, hamulce samolotowe.

W zakresie bardzo ogólnym realizowana metodyka badawcza obejmuje swoim zakresem następujące niezależne zasadnicze dziedziny badawcze:

- określenie składu fizycznego materiałów,
- badania składu chemicznego,
- określenie stanu powierzchni badanych elementów tarcowych lub par ciernych,
- ograniczone do pomiarów twardości badania wytrzymałościowe,
- zdolność materiałów do rozwijania sił tarcia w zależności od nacisków:
  - w temperaturze otoczenia,
  - w temperaturach podwyższonych.
- wyznaczenie wartości współczynników tarcia ślizgowego materiałów podczas pracy w warunkach zbliżonych do rzeczywistych warunków eksploatacyjnych.

*W naszym przypadku ograniczymy się do wyznaczenia zdolności materiałów do rozwijania sił tarcia w zależności od nacisków wyznaczając te zmiany w temperaturze otoczenia.*

## 3 MATERIAŁY I PRÓBKIE BADAWCZE

### 3.1 Materiały badawcze

Badaniami niniejszego projektu objęte zostały materiały cierne trzech producentów polskich pracujących na potrzeby przemysłu samochodowego, materiały stosowane w przemyśle samochodowym i kolejowym w krajach Europy Zachodniej, głównie we Francji, a także materiał wytwarzany na potrzeby przemysłu lotniczego.

W tabelicy 7.1 zamieszczone zostało zestawienie oznaczeń użytych w badaniach materiałów oraz podane twardości próbek materiałowych wykonanych w kształcie prostokąta o wymiarach 60×60×10.

Tablica 1 Oznaczenia badanych materiałów ciernych

L.p.	Oznaczenie materiału	Twardość	L.p.	Oznaczenie materiału	Twardość [N/mm <sup>2</sup> ]
1	LU-A	120 896		1-71	48
2	LU-B	150 834	9	1-58	140
3	LU-C	50 286	10	1-64	150
4	LU-D	150	11	WW	80-100
5	FR-113	70-90 48	12	MK-1	120
6	FR-123	50-70 68	13	MK-2	120 273
7	1-94	120			

*Własności drugiego elementu pary cierniej:*

*-przeciwpróbka ze stali narzędziowej N8E hartowana, szlifowana do wartości parametru  $R_a \cong 0,6-1, 2 \mu m$ .*

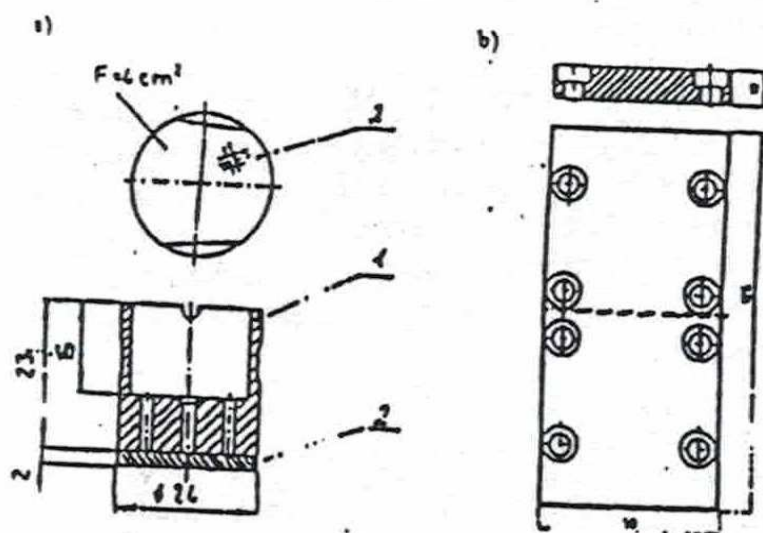
### 3.2 Konstrukcja i dobór parametrów badawczych próbek materiałowych

Przystosowując materiały do pomiarów na stanowisku laboratoryjnym, przygotowane zostały specjalne próbki badawcze z naklejonymi różnymi rodzajami materiałów. W badaniach wykorzystane zostały próbki materiałów ciernych, których schemat przedstawiony został na rysunku 1.

Każda z przygotowanych próbek składa się z dwu części:

- specjalnie ukształtowanej stalowej części walcowej 1 oraz
- z przyklejonego do niej na części czołowej, materiału ciernego 2.

Mocowany na konstrukcji stalowej 1 próbki, materiał cierny 2, został przygotowany w taki sposób, jak to zostało pokazane na rzucie od dołu na rysunku .1a; a więc powierzchnia materiału wynosi  $4 \text{ cm}^2$ , a jej ustawienie względem osi rzutu głównego pokazanego na tym rysunku, zgodnie z naniesionymi wymiarami.



Rys..1. Konstrukcje: próbki badawczej i przeciwpróbki

### 3.2 Konstrukcja i dobór parametrów przeciwpróbki

Drugim elementem współpracującym w parze cierniej z próbką badawczą jest przeciwpróbka stalowa, która stanowi integralną część stanowiska badawczego. Ma ona kształt prostokątny i następujące wymiary:  $120 \times 50 \times 10$ . Wykonana została ze stali narzędziowej N8E, a jej powierzchnia kontaktu z próbką badawczą charakteryzują następujące wartości parametru chropowatości  $R_a = 0.6 + 1.2 \mu\text{m}$  mierzone w dwóch kierunkach prostopadłych względem siebie, tzn. w kierunku długościowym i szerokościowym; powierzchnia płytki jest hartowana, szlifowana, a następnie docierana przy zachowaniu prostopadłej kierunku struktury



#### 4. OPIS STANOWISK BADAWCZYCH I METOD POMIARÓW

Przed rozpoczęciem pomiarów mających na celu wyznaczenie szczegółowych wartości sił tarcia rozwijanych na powierzchniach par ciernych składających się z badanego materiału i przeciwności dokonano oględzin tych elementów pod mikroskopem, wyznaczano parametry pozwalające określić skład pierwiastkowy badanego materiału, wiązania chemiczne, stan chropowatości powierzchni oraz twardość.

##### 4.1 Stanowiska do wyznaczania składu pierwiastkowego oraz struktury chemicznej badanych materiałów

Skład pierwiastkowy wybranej grupy badanych materiałów określano wykorzystując mikroskop elektronowy (SEM) Typ-S-2460N (Hitachi) przeznaczony do badań materiałów w wysokiej próżni i wyposażony w detektor z dyspersją energii (ESD). Otrzymany obraz powierzchni próbki oraz widmo promieniowania roentgenowskiego pozwalają na podstawie mikroanalizy określić wszystkie wchodzące w skład badanej struktury materiału pierwiastki.

Do określenia składu chemicznego materiałów zastosowana została metoda mikrospektrofotometrii. Polega ona na zastosowaniu techniki odbiciowego pomiaru wielopunktowego badanej powierzchni i wyznaczeniu wartości parametrów widm cząsteczek w podczerwieni. Na tej podstawie można wyznaczyć związki oraz grupy funkcyjne wchodzące w skład struktur materiałowych badanych struktur.

##### 4.2 Stanowiska do wyznaczania stanu chropowatości powierzchni i twardości

Wstępne określenie stanu powierzchni przygotowanych do badań próbek przeprowadzono wykorzystując optyczny mikroskop stereoskopowy produkcji ZPO TypMST131 w wyposażeniu standardowym. Stosując 80-krotne powiększenie obserwowanych powierzchni próbek materiałowych możliwe było stwierdzenie czy nie istnieją pęknięcia lub inne, np. miejscowe wyrwania, wady materiałowe dyskwalifikujące próbkę z dalszych eksperymentów.

Do pomiarów chropowatości powierzchni przygotowanych próbek materiałowych zastosowany został specjalistyczny profilogramometr RMS firmy Mitutoyo Model 402 serii 178 w wyposażeniu standardowym.

Zakładając, że stan powierzchni w dostatecznym stopniu określają parametry chropowatości powierzchni  $R_m$ ,  $R_z$  oraz  $R_{max}$  przyjęto zasadę dokonywania pomiarów chropowatości w dwóch prostopadłych względem siebie kierunkach; jeden z nich wyznaczał kierunek ruchu pary cierniej, drugi był do niego prostopadły. Parametry chropowatości próbek materiałowych określano dla każdego cyklu badawczego próbki.

Wyznaczania wartości parametrów twardości próbek materiałowych dokonano wykorzystując maszynę wytrzymałościową firmy ZWICK 8314. Ze względu na niejednorodność struktury badanych materiałów do pomiarów parametrów twardości zaadaptowano metodę stosowaną do określania twardości tworzyw sztucznych. Metoda ta zalecana jest przez przepisy normy PN-93/C-89030/01. Wymieniona norma przewiduje w eksperymencie kilka skal obciążeń pomiarowych. W niniejszych badaniach przyjęto, że właściwy dobór obciążenia pomiarowego jest wówczas gdy spełniony jest warunek, że uzyskiwane głębokości odcisków mieszczą się w przedziale 0,15[mm] do 13,5[mm].

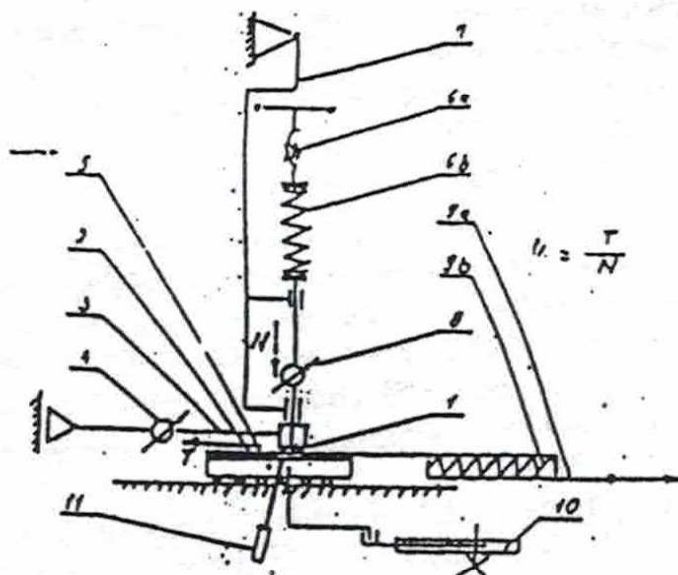
### 4.3 Stanowisko badawcze do pomiarów sił tarcia

Pomiary wielkości parametrów pozwalające wyznaczać wartości sił tarcia jakie są rozwijane na powierzchniach par ciernych badanych materiałów, temperaturę powierzchni stykających się par ciernych oraz zależne od działających na układ sił, przemieszczenia i czas, są przeprowadzone na stanowisku badawczym skonstruowanym do tego typu badań i przedstawionym na rysunku.2.

Na podstawie wielkości bezpośrednio rejestrowanych podczas badań, możliwe jest wyznaczenie wartości współczynników tarcia spoczynkowego i ruchowego badanych materiałów w funkcji czasu, przemieszczeń, nacisków, temperatury oraz także w funkcji prędkości.

*Nasze zadanie polega na wyznaczeniu tylko wartości współczynników tarcia badanych materiałów ciernych w funkcji nacisków.*

Schemat stanowiska badawczego oraz zasadę jego działania objaśniono na rys.6



Rys.6

Mocowana w zakończeniu specjalnego uchwytu cięgna 3 próbka 1, tworzy z przeciwpróbką 2 parę cierną. Na próbkę 1 poprzez czujnik pomiaru siły 8 za pomocą śruby 6a, ale za pośrednictwem sprężyny 6b wywoływane jest obciążenie pionowe. Specjalne urządzenie przegubowe 7 zapewnia osiowość działania pionowego obciążenia próbki.

Drugi element pary cierniej, przeciwpróbka 2 jest zamocowana w przesuwnej "karetce" 5. Jest to specjalna konstrukcja zapewniająca minimalizację oporów przesuwu tego elementu stanowiska. Poprzez urządzenie śrubowe 9a za pośrednictwem sprężyny 9b wywoływana jest siła pozioma, która w końcowym efekcie realizacji eksperymentu, po przekroczeniu granicznej wartości siły tarcia występującej na powierzchniach pary cierniej próbka-przeciwpróbka, wywołuje przemieszczenie "karetki" z zamocowaną przeciwpróbką. Pomiary przemieszczania się "karetki" rejestrowane są poprzez czujnik przemieszczeń 10. Wywoływana za pośrednictwem urządzenia 9 siła pozioma obciąża parę cierną 1-2 ciągnąc 3; jej wartość rejestrowana jest za pośrednictwem czujnika siły poziomej 4. Wartość siły poziomej zależy od wartości obciążenia pionowego wywieranego na parę cierną.

otrzymywane są w postaci sygnałów elektrycznych przesyłane są poprzez odpowiednie kanały karty pomiarowej do pamięci komputera. Komputer z odpowiednim oprogramowaniem przystosowanym do prowadzenia tego typu pomiarów jest więc tutaj urządzeniem zbierającym i rejestrującym zmierzone wielkości. Podstawowymi funkcjami programu są :

- pomiar,
- prezentacja
- "wejście-wyjście".

Pomiary obejmowały wartości następujących wielkości:

- siły nacisku normalnego,
- siły tarcia pomiędzy powierzchniami współpracującej pary ciernej,
- wzajemnego przemieszczenia elementów współpracującej pary ciernej,
- temperaturę pomiaru,
- czas trwania pomiaru.

Mierzenie wymienionych wielkości odbywało się jednocześnie poprzez kolejne kanały karty pomiarowej.

Prezentacja rezultatów oparta jest na:

- przeglądzie wybranych i zarejestrowanych wielkości,
- przeglądzie zmierzonych wartości w postaci tabel,
- sporządzeniu na podstawie zarejestrowanych wartości odpowiednich wykresów.

Funkcja "wejście-wyjście" umożliwia:

- zapis i odczyt zmierzonych wartości na dysku komputera,
- eksport wykresów do pliku DXF,
- sporządzenie wydruku danych tabelaryzowanych.

W dalszym ciągu mierzone wartości parametrów przesyłane były do pliku tekstowego, a dalsza obróbka dokonywana za pomocą programu Excel. Operacja powyższa pozwoliła na swobodną obróbkę danych umożliwiając jednocześnie uzyskanie wykresów nie tylko w formie zależności bezpośrednich ale także na ich opracowanie w postaci funkcji wyliczonych na podstawie rezultatów eksperymentu.

Niezależnie stanowisko badawcze wyposażone jest w system zapisu wartości pomiarowych w czasie rzeczywistym.

Do tego celu wykorzystywany jest rejestrator 6-kanalowy pozwalający na obserwację i zapis wartości zadawanych i mierzonych parametrów w czasie rzeczywistym.

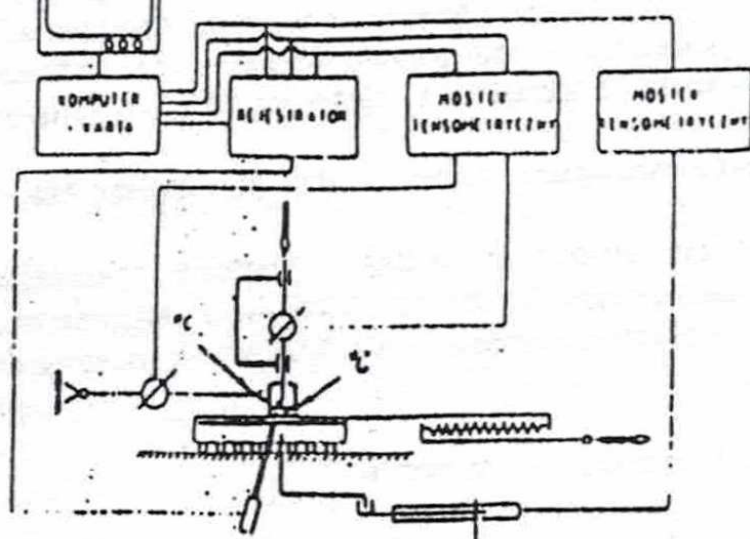
Do pomiaru wartości rozwijanych sił tarcia suchego, zastosowany został piezoelektryczny czujnik jednostronnego działania (pracujący na naciski) produkcji Hottinger Baldwin Messtechnik GMBH, Typ C9A.

Przy pomocy identycznego w budowie, chociaż o innym zakresie pomiarowym, czujnika produkcji tej samej firmy, rejestrowane są również wartości nacisków normalnych na próbkę.

Do pomiaru wartości przemieszczeń wykorzystany został czujnik indukcyjny również produkcji firmy Hottinger Baldwin Messtechnik GMBH, który ma oznaczenie MB-4.

Dodatkowym elementem pomiarowym stanowiska może być również termopara do pomiaru temperatury.

Zespół czujników oraz wykorzystywana podczas eksperymentu badawczego aparatura zostały pokazane schematycznie na rysunku 7.



Rys.7

## 5 ORGANIZACJA I PRZEBIEG EKSPERYMENTÓW

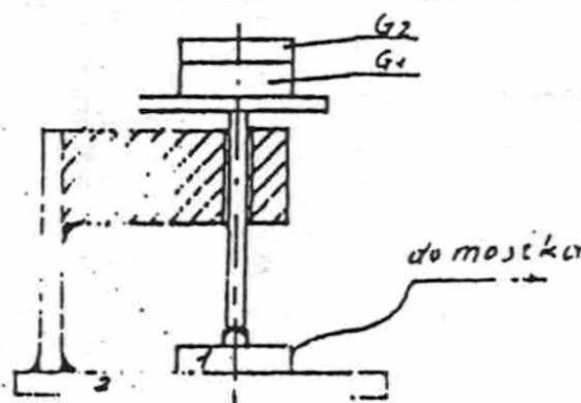
Eksperyment badawczy polegający na wyznaczeniu wartości współczynników tarcia spoczynkowego i ruchowego wybranych materiałów ciernych składa się z trzech etapów:

- cechowania czujników pomiarowych,
- pomiarów wykonanych dla jednego materiału ciernego przy różnych wartościach nacisków na próbkę,
- obróbki otrzymanych parametrów pomiarowych, które służą do wyznaczenia wartości współczynników tarcia.

### 5.1 Cechowanie czujników pomiarowych

#### 5.1.1 Cechowanie czujników sił

Cechowanie dwóch, stosowanych w eksperymencie czujników pomiarowych służących do pomiaru i rejestracji wartości sił przeprowadza się na specjalnym urządzeniu, którego schemat zamieszczony został na rysunku 8.



Rys.8

Czujnik pomiarowy 1, zostaje umieszczony na podstawie 2 urządzenia do cechowania. Pionowy przesuwany pręt wraz z zamocowaną na nim płytką zostaje uniesiony w taki sposób, aby nie dotykał czujnika.

W tej pozycji pręta następuje "wyzerowanie" aparatury pomiarowej poprzez odpowiedni dobór parametrów opornościowo pojemnościowych mostka pomiarowego. Należy zwrócić uwagę, aby zerowanie mostka następowało przy odpowiednim, włączonym kanale pomiarowym.

Po wyzerowaniu aparatury należy czujnik obciążyć znaną wartością siły po czym

Następnie, należy zwiększyć obciążenie działające na czujnik siły, ponownie uruchomić aparaturę rejestrującą otrzymując kolejne wartości obciążenia.

Procedurę należy powtarzać w odwrotnym kierunku, tzn. odciążając czujnik dzięki kolejno zdejmowanym z urządzenia ciężarom, aż do zerowych wartości obciążenia czujnika..

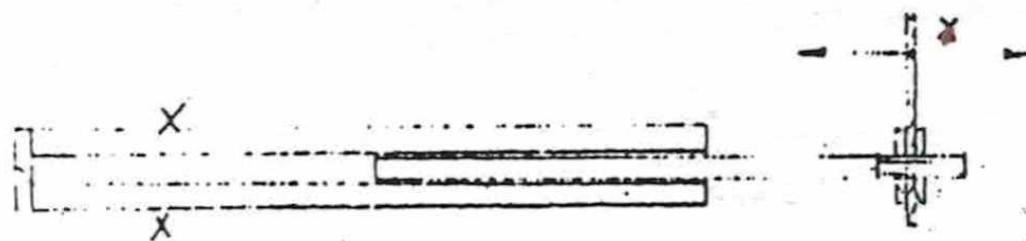
Podobny proces cechowania należy przeprowadzić dla drugiego czujnika siły.

Na podstawie zarejestrowanych w voltach wartości przemieszczeń należy sporządzić wykresy obciążeń w funkcji przemieszczenia, a następnie odczytać jakiej wartości mierzonego w voltach przemieszczenia odpowiada odpowiednia wartość obciążenia rzeczywistego.

### 5.1.2 Cechowanie czujnika przemieszczenia

Proces cechowania indukcyjnego czujnika przemieszczeń (Rys.9) można przeprowadzić w następujący sposób:

- ustawić wewnętrzną przesuwą część czujnika w takim położeniu mniej więcej, aby część ruchoma była wysunięta do około połowy długości,
- wyzerować przy takim położeniu części ruchomej czujnika mostek pomiarowy pokrętkami rezystancji i pojemności,
- zarejestrować tak wyznaczone położenie uruchamiając odpowiedni program komputerowy,
- suwmiarką odmierzyć określoną wartość przemieszczenia po czym spowodować przesunięcie części ruchomej czujnika o tę wartość
- dokonać rejestracji położenia,
- powtórzyć procedurę dla przynajmniej dwóch kolejnych położeni części ruchomej czujnika,
- sporządzić wykres przemieszczenia w funkcji napięcia,
- odczytać jakiej wartości zarejestrowanego napięcia odpowiada przyjęta przemieszczenia.



Rys.9

Właściwy pomiar siły tarcia dla jednej serii i jednej tylko próbki pomiarowej obejmuje w kolejności następujące czynności:

- 1) -włączenie aparatury pomiarowej i rejestrującej,
- 2) -odpowiednie jej nagrzanie,
- 3) -cechowanie wszystkich czujników stanowiska badawczego (do pomiarów siły tarcia, siły nacisku normalnego, czujnika przemieszczeń, termopar),
- 4) -odtłuszczenie powierzchni materiału ciernego próbki oraz odtłuszczenie powierzchni przeciwpróbki,
- 5) -instalację próbki w gnieździe odpowiedniej końcówki cięgna stanowiska badawczego,
- 6) -dokładne sprawdzenie osiowości pionowego obciążenia próbki i w miarę potrzeby odpowiednią regulację,
- 7) -wymuszenie ruchu przeciwpróbki, wymuszenie poślizgu pary cierniej z jednoczesną rejestracją siły tarcia, nacisku, temperatury, przemieszczenia i czasu pomiaru,
- 8) -3-krotną zmianę pionowego nacisku na próbkę i powtórzenie czynności od 1 do 8.

### 5.2.2 Pomiar parametrow dla kolejnych próbek materiałowych

W dalszej części eksperymentu następuje wymiana próbki na inną, jednak z tym samym materiałem badawczym i czynności od 1 do 8 są powtarzane. Po zakończeniu całej serii badań powtarza się jeszcze dwukrotnie pomiary dla tego samego materiału, zmieniając kolejno próbki.

W dalszej kolejności następuje zmiana materiału próbki i cykl pomiarowy rozpoczyna się od początku.

## 5.3 Zapis i rejestracja wielkości obliczanych i nierejestrowanych automatycznie.

### 5.3.1 Rejestracja komputerowa

Podczas wykonywania każdego pomiaru program komputerowy przetwarza otrzymany sygnał z czujników pomiarowych rejestrując otrzymane wyniki w tablicy oraz wyświetla wykres podstawowych wielkości na ekranie monitora. Jednak wyniki te bezpośrednio nie nadają się do dalszej obróbki i dlatego przesyłane są do pliku tekstowego, a następnie poddawane obróbce przy wykorzystaniu specjalistycznych programów komputerowych.

## 6. REJESTRACJA I OPRACOWANIE REZULTATÓW BADAŃ

Rejestracja wyników badań następuje w sposób automatyczny za pośrednictwem odpowiedniego programu komputerowego. Rezultaty przeprowadzonych pomiarów zapisywane są zapisane w postaci odpowiednich kolumn liczbowych, które w dalszej obróbce mogą być opracowane, np. 1 przy pomocy programu EXCEL. Dzięki temu mogą być otrzymane gotowe wykresy w różnych konfiguracjach parametrów.

- siły normalnej,
- siły tarcia,
- przemieszczenia,
- temperatury styku powierzchni pary ciekłej.

Pomiary siły nacisku i siły tarcia dokonywane są za [pomocą czujników tensometrycznych firmy Hottinger i są połączone z mostkiem tej samej firmy.. Sygnały z mostka przekazywane są do komputera przez zbiorczą kostkę. Przemieszczenie przeciwpróbki podczas wykonywania eksperymentu mierzone jest za pomocą czujnika indukcyjnego produkcji również firmy Hottinger . Sygnał z czujnika po wzmacnieniu na mostku jest również przekazywany do kostki zbiorczej i do komputera. Temperatura powierzchni styku próbki i przeciwpróbki mierzona jest za pomocą specjalnej termopary. Stąd sygnał z termopary poprzez wzmacniacz przekazywany jest poprzez kostkę zbiorczą do komputera.

Wzmocnienia wszystkich sygnałów muszą być tak dobrane, by ich wartości nie przekraczały napięcia 5V w całym zakresie pomiarowym.

Po włączeniu komputera:

- wybieramy tryb pracy MS DOS (trzecia linijka),
- uruchamiamy program WINDOWS wpisując: -win {ENTER}.

Po pojawieniu się okna "Aplikacje" z ikonami wybieramy:

- Test 4 uruchamiając program badawczy.

Po uruchomieniu programu badawczego wybieramy:

- OPCJE -częstotliwość próbkowania (rejestracji pomiarów).

Najwyższa częstotliwość wynosi 1000 pomiarów/sekundę (wybieramy wtedy wartość 1). Wybierając wartość 10 uzyskamy rejestrację 100 pomiarów/sec (ta wartość jest ustawiona w programie).

Przed przystąpieniem do badań przeprowadzamy kalibrację poszczególnych kanałów rejestrujących. Uruchamiamy: OPCJE-kalibracja-np kanał 1 -siła tarcia, kanał 2 -siła normalna, kanał 3 -przemieszczenie, kanał 4 -temperatura. Kalibrację wykonuje się w jednostkach fizycznych.

-Przygotowując się do eksperymentu uruchamiamy opcję:

-pomiar -uzyskując stan gotowości ; po wciśnięciu ENTER komputer rozpoczyna rejestrację wszystkich badanych parametrów.

Czasu trwania eksperymentu nie należy przedłużać kończąc pomiar ponownym wciśnięciem klawisza ENTER.

Na ekranie pojawia się wtedy tablica z wartościami minimalnymi i maksymalnymi poszczególnych rejestrowanych wielkości jakie uzyskane zostały podczas całego trwania pomiaru. Można również obejrzeć przebiegi zmierzonych wartości na wykresach.

Zapisujemy zmierzone wartości wywołując: PLIK -Zapisz jako -nazwa.lc. Taki zapis pozwala na obejrzenie w każdej chwili zapisanych na dysku wartości i wykresów.

Program daje możliwość zapisu rejestrowanych wyników w postaci kolumn liczbowych w plikach tekstowych -wybieramy opcję PLIK -EKSPORT- TEXT -nazw.txt.

Jest to zapis przebiegów czasowych poszczególnych wielkości -kolumny liczbowe przedstawiają odpowiednio wartości siły tarcia, siły normalnej

przemieszczenia i temperatury w jednostkach fizycznych przyjętych podczas kalibracji. Pliki te można odtworzyć, np. w programie EXCEL i tam dokonywać ich obróbki, sporządzać wykresy i td..

## ZAKOŃCZENIE

1. Zadaniem Studentów jest przeprowadzenie opisanych eksperymentów, wyznaczenie niezbędnych wartości parametrów do sporządzenia wykresu ilustrującego zmianę wartości współczynników tarcia spoczynkowego w funkcji nacisków oraz opracowanie wniosków.
2. Do instrukcji dołączone zostały załączniki ilustrujące wybrane właściwości niektórych, badanych materiałów ciernych.

## ZAŁĄCZNIKI

Załącznik 1. Wybrane parametry dotyczące składu badanych materiałów.

Lp .	Oznaczenie materiału	Skład pierwiastkowy materiału % skład pierwiastków
1	LU-A	
2	LU-B	C=64,7; O=22,37; Fe=0,47; Mg=0,43; Ba=5,7; Al.=0,77; Si 1,43; S=1,23; K=0,1 Ca=1,53; Co=0,67; Sr=0,133; I=0,033
3	LU-C	C=59,3; O=23,5; Ca=2,13; Na=0,43; Mg=0,7; Si=2,57; S=1,57; K=0,13 Ba=7,39; Al=1,3
4	LU-D	C=64,9; O=21,7; Fe=5,0; Na=0,5; Ba=1,5; Al.=0,73; Si=1,9; Zr=0,2;
5	FR 113	Zn=0,68; C=49,03; Fe=6,46; O=39,3; Na=0,17; Ba=1,5; Cl=0,15; Al=0,73; S=0,65; Ca=7,1.
6	FR 123	C=49; O=29,03; Fe=7,5; Na=0,06; Mg=0,1; Ba=2,2; Al=0,56; Si=1,5; S=0,8; Cl=0,1; Ca=8,37; Zn=0,76
7	I-94	C=62; O=17,5; Fe=3,5; Na=0,56; Mg=0,3; Ba=6,0; Al=0,3; Si=0,5; S=3,7; Ca=1,63; Zr=2,7.
8	I-71	C=63,1; O=18,1; Fe=6,7; Cu=4,9; Na=0,3; Mg=0,3; Al=1,3; Si=2,2; S=0,36; Sn=0,23; Ca=0,5; Zn=2,03
9	I-64	C=62,1; O=19,3; Fe=9,03; Cu=2,9; Na=0,2; Mg=0,4; Al=1,23; Si=1,4; S=1,06; Ca=0,6; Zn=0,86; Mn=0,01
10	I-58	C=58,3; O=22,8; Fe=1,34; Na=0,27; Mg=0,2; Ba=9,67; Al=0,5; Si=0,6; S=4,2; Ca=2,2
11	WW	C=98,8; Al=0,2
12	MK 1	
13	MK 2	



Nr próbki	Numer próbki	Chropowatość			Twardość $R_c$ I		Uwagi
		$R_a$	$R_z$	$R_{max}$	N/mm <sup>2</sup>		
194	155	7,8	37	56	356	358	
	156	9,8	43	55	370	395	
	157	9,4	43	58	394	366	
	158	7,0	44	66	387	365	
Wartości średnie		8,5	33,25	58,75	373,875		

## Załącznik 3

## Wybrane własności badanych materiałów ceramicznych

Lp	Oznaczenie	Podstawowe własności materiału				
		Materiał	gęstość g/cm <sup>3</sup>	Twardość Mpa	Odporność Chemiczna	Opis materiału
1	FO 111					AZBESTOWY
2	FO 209	2,1	50-70	Dobra		Bezazbestowy, prasowany, z żywicy syntetycznej, kauczuk syntetycznego, wełny stalowej, wypełniacza niemetalicznego
3	FO 701			Dobra		Bezazbestowy, prasowany, z żywicy syntetycznej, kauczuk syntetycznego, wełny stalowej, wypełniacza niemetalicznego
4	FO 707	2,3	120	Dobra		Bezazbestowy, prasowany, z żywicy syntetycznej, kauczuk syntetycznego, wełny stalowej, wypełniacza niemetalicznego
5	FO 708	2,2	150	Dobry		Bezazbestowy, prasowany, z żywicy syntetycznej, kauczuk syntetycznego, wełny stalowej, wypełniacza niemetalicznego
6	T 283					
7	T 479					
8	T 6109	2,1	50	Dobre		Bezazbestowy, prasowany, z żywicy syntetycznej, kauczuk syntetycznego, wełny stalowej, wypełniacza niemetalicznego
9	TEX					
10	JUR					
11	STR					Bezazbestowy, sprasowany, bez wypełniaczy, z żywicy, kauczuku i włókna mineralnego
12	WW					Kompozyt węgiel-grafit
13	WM					Kompozyt metaloceramiczny, azbestowy

Własności drugiego elementu pary ceramicznej  
-przeciwpróbka ze stali 10 hartowana, szlifowana do wartości parametru  $R_a \cong 0,6-1,2 \mu m$   
Użyte skróty: TEX-material Textar, JUR-Jurid, STR-Strukturalny, WW-Włókna węglowe, WM-materiał metaloceramiczny