

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
WYDZIAŁ CHEMICZNY

KATEDRA FIZYKOCHEMII I TECHNOLOGII
POLIMERÓW

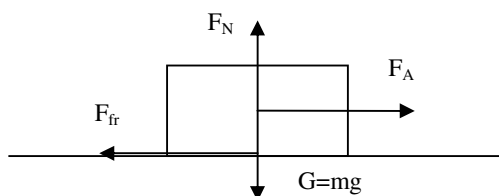
LABORATORIUM Z FIZYKI

Badanie sił tarcia

Wprowadzenie

Tarcie jest to zjawisko fizycznej dyssypacji energii kinetycznej na ciepło. **Siły tarcia** odgrywają bardzo ważną rolę w naszym życiu codziennym. Siły te, jeżeli im nie przeciwdziałamy powodują zatrzymanie każdego poruszającego się ciała. W związku z tym wiele wysiłku poświęca się na opracowanie metod pozwalających zmniejszyć tarcie. Z drugiej jednak strony, gdyby nie było tarcia, nie moglibyśmy chodzić, pisać, nie byłoby transportu kołowego.

Z mikroskopowego punktu widzenia tarcie jest zjawiskiem bardzo skomplikowanym. Co dzieje się na poziomie atomowym dokładnie nie wiadomo. Przypuszcza się, że może dochodzić do takiego zbliżenia atomów należących do wypukłości obydwu oddziaływujących powierzchni, co prowadzi do tworzenia się „wiązań” pomiędzy atomami (oddziaływania sił elektrostatycznych). Przesuwanie obiektu wzdłuż powierzchni jest często nierównomierne, być może z powodu tworzenia i zrywania tych „wiązań”. Nawet, gdy okrągłe przedmioty toczą się po powierzchni nadal istnieje tarcie, nazywane **tarciem tocznym**, które jest zdecydowanie mniejsze od tarcia poślizgu, które zwykle nazywane jest **tarciem kinetycznym**. Kiedy obiekt ślizga się po szorstkiej powierzchni, siła tarcia kinetycznego działa w kierunku przeciwnym do prędkości obiektu. Wielkość tej siły zależy od rodzaju tych dwóch powierzchni. Siła tarcia jest wprost proporcjonalna do siły normalnej, prostopadłej do powierzchni kontaktu (Rys.1.).



Rys.1.

Kiedy na obiekt działa siła F_A , siła tarcia F_T przeciwdziała ruchowi. Wartość siły tarcia jest wprost proporcjonalna do siły normalnej F_N (równanie 1). Wartość siły tarcia nie zależy od wielkości powierzchni A .

$$\mathbf{F}_T = \mu_k \mathbf{F}_N \quad (1)$$

To równanie pokazuje relację pomiędzy wielkością siły tarcia F_T , która jest równoległa do dwóch oddziaływujących powierzchni, a siłą normalną, która działa do nich prostopadle. Wartość współczynnika tarcia kinetycznego μ_k zależy od rodzaju powierzchni (sucha, mokra, chropowata, wygładzona).

Tarcie statyczne jest siłą równoległą do dwóch powierzchni, która powstaje, gdy te powierzchnie pozostają w spoczynku. Przypuśćmy, że mamy obiekt, np. deskę, która spoczywa na podłodze. Jeżeli żadna siła pozioma nie działa na deskę, nie występuje również siła tarcia. Ale gdy zadziałamy na deskę siłą poziomą, a ona w dalszym ciągu się nie porusza, to oznacza, że musi występować tam siła powstrzymująca deskę od ruchu. Jest to siła tarcia statycznego, wywierana na deskę przez podłogę. Jeżeli będziemy pchać z większą siłą bez przesuwania deski, siła tarcia statycznego będzie rosła. Natomiast, gdy przyłożymy wystarczająco dużą siłę deska zacznie się poruszać i pojawi się tarcie kinetyczne. W tym momencie zostaje osiągnięta maksymalna wartość siły tarcia statycznego, która jest podana wzorem:

$$F_T = \mu_s F_N \quad (2)$$

gdzie: F_N - siła normalna

μ_s - współczynnik tarcia statycznego

Gdy siła tarcia statycznego może zmieniać się od 0 do wartości maksymalnej, możemy napisać:

$$F_{fr} \leq \mu_s F_N \quad (3)$$

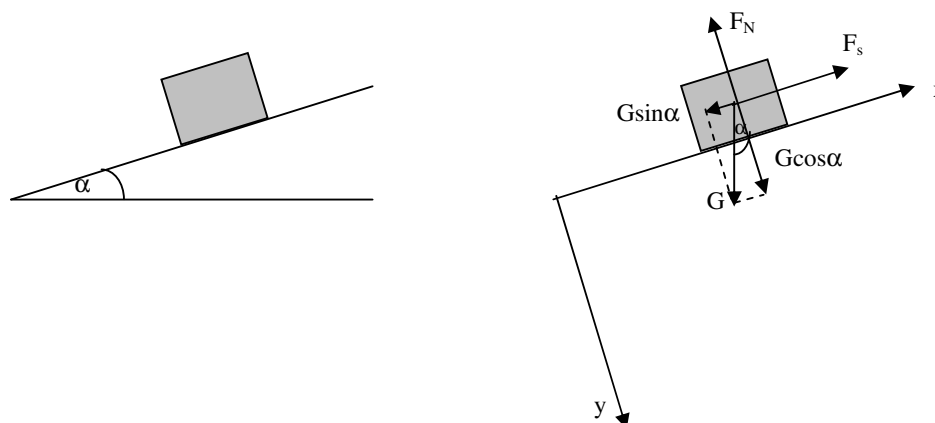
Należy zauważyć, że znacznie łatwiej jest utrzymać ciężki obiekt w ruchu, niż wprawic go w ruch ze spoczynku (μ_s jest większe niż μ_k).

Część doświadczalna:

Pomiar współczynników tarcia statycznego, kinetycznego i przy toczeniu.

Część Ia Pomiar współczynnika tarcia statycznego i kinetycznego za pomocą równi pochyłej

Do pomiaru współczynnika tarcia stosuje się równię pochyłą. Na równi o kącie pochylenia α znajduje się klocek z badanego materiału. Konstrukcja równi zapewnia możliwość płynnej zmiany kąta. Rysunek przedstawia siły działające na klocek (rys.2).



Rys.2 Pomiar współczynnika tarcia za pomocą równi pochyłej: a) schemat, b) rozkład sił

Obieramy układ współrzędnych x, y przypisując oś x wzdłuż powierzchni równi pochyłej, a oś y w kierunku normalnej do niej. Znajdując składowe sił w kierunku tych osi obliczamy współczynnik tarcia statycznego:

$$\mathbf{G} \cos \alpha - \mathbf{F}_N = 0 \quad (4)$$

$$\mathbf{F}_S - \mathbf{G} \sin \alpha = 0 \quad (5)$$

$$\mathbf{F}_S \leq \mu_S \mathbf{F}_N \quad (6)$$

Zwiększając kąt α stwierdzamy, że gdy osiągnie on pewną wartość α_S , klocek zaczyna się zsuwać w dół. Wtedy:

$$\mathbf{F}_S = \mu_S \mathbf{F}_N = \mathbf{G} \cdot \sin \alpha_S \quad (7)$$

$$\mathbf{F}_N = \mathbf{G} \cos \alpha_S \quad (8)$$

$$\mu_S \cdot \mathbf{G} \cos \alpha_S = \mathbf{G} \cdot \sin \alpha_S \quad (9)$$

$$\mu_S = \operatorname{tg} \alpha_S \quad (10)$$

Z chwilą, gdy kąt równi pochyłej osiągnie wartość α_S klocek zaczyna się zsuwać w dół ruchem jednostajnym przyspieszonym, ponieważ opór tarcia kinetycznego jest mniejszy niż opór tarcia statycznego. Teraz możemy ponownie zmniejszyć wartość kąta α , do wartości α_k , przy której klocek zsuwa się ruchem jednostajnym. Wówczas, zgodnie z I zasadą dynamiki Newtona, siły

działające na klocek ponownie się zrównoważą i znajdujemy analogicznie jak w przypadku tarcia statycznego współczynnik tarcia kinetycznego:

$$\mu_k = \operatorname{tg} \alpha_k \quad (11)$$

Dla 3 różnych par powierzchni klocka (metal, drewno, guma) i równi wykonujemy serię pomiarów (Tab.1). Pomiarów należy dokonywać z tego samego punktu początkowego.

Tabela 1

N ^o	Materiał powierzchni równi	Materiał powierzchni klocka	α_s	α_k	μ_s	μ_k

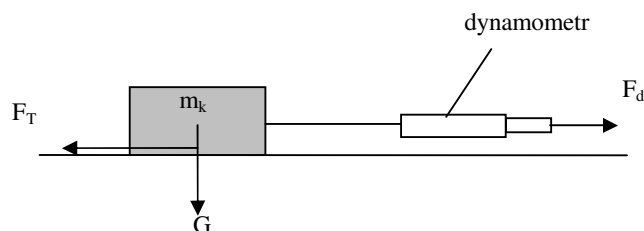
Przez płynną zmianę kąta nachylenia równi wyznaczamy kąt α_s przy którym klocek zaczyna się zsuwać z równi, oraz kąt α_k , dla którego klocek zsuwa się z równi ruchem jednostajnym prostoliniowym. Każdy pomiar powtarzamy sześciokrotnie.

Część Ib *Pomiar współczynnika tarcia kinetycznego*

Pomiaru współczynnika tarcia kinetycznego można również dokonać za pomocą prostego zestawu (rys.3). Znając masę klocka m_k i siłę, która wywołuje jego ruch jednostajny prostoliniowy (pomiaru siły F_d dokonujemy za pomocą dynamometru) współczynnik tarcia μ_k znajdujemy ze wzoru:

$$\mu_k = \frac{F_d}{m_k g} = \frac{F_d}{G} \quad (12)$$

gdzie: g- przyspieszenie ziemskie



Rys.3 Zestaw do pomiaru współczynnika tarcia kinetycznego

Za pomocą zestawu przedstawionego na rys.3 wykonujemy serię sześciu pomiarów współczynnika tarcia kinetycznego. Masa klocka, płytki metalowej i gumowej podane są w zestawie. W ćwiczeniu stosujemy klocki o różnej masie. Dynamometrem mierzymy siłę potrzebną do wprowadzenia klocka w ruch jednostajny prostoliniowy F_d .

Tabela 2

N ^o	Materiał powierzchni równi	Materiał powierzchni klocka	Masa klocka m_k	F_d	$\mu_k = \frac{F_d}{m_k g}$

Uzyskane wartości współczynnika tarcia kinetycznego należy porównać z wartościami współczynnika wyznaczonego poprzednią metodą (część Ia). Ponieważ współczynniki powinny być sobie równe niezależnie od metody pomiaru, należy przynajmniej dla jednego materiału porównać współczynnik w trakcie ćwiczenia i spróbować wykonać pomiary na równi i za pomocą dynamometru, które dadzą ten sam wynik. Zanotować co stoi na przeszkodzie poprawnych pomiarów.

Część II. Wyznaczanie współczynnika tarcia przy toczeniu

Odmienne typ tarcia stanowi **tarcie toczone**. Na przykład walec zaczyna się toczyć (rys.4) dopiero wtedy, gdy kąt pochylenia przekroczy pewną wartość krytyczną (nie zostaną rozróżnione współczynniki tarcia kinetycznego i statycznego, ze względu na bliską ich wartość). Siłą działającą jest ciężar G walca położony w jego środku masy. Dla granicznego kąta α_g nacisk walca na równię pochyłą jest:

$$F_N = G \cos \alpha \quad (13)$$

natomiast

$$F_S = G \sin \alpha \quad (14)$$

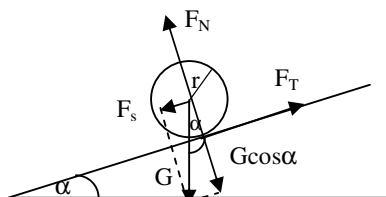
jest składową siły pokonującą opór tarcia.

$$F_T - F_S = 0 \quad (15)$$

$$F_T = F_S \quad (16)$$

Moment ciężaru walca względem punktu styku T przekroju z równią pochyłą równy jest, co do wartości:

$$M = F_T r = G r \sin \alpha \quad (17)$$



Rys.4 Rozkład sił w przypadku tarcia przy toczeniu

Moment ten musi być równoważony przez moment tarcia toczonego, proporcjonalny do siły nacisku F_N . Mamy wtedy:

$$G r \sin \alpha = \mu_T G \cos \alpha, \quad (18)$$

gdzie: μ_T - współczynnik proporcjonalności, nazywany **współczynnikiem tarcia toczonego**.

$$\mu_T = r \operatorname{tg} \alpha \quad (19)$$

Współczynnik tarcia toczonego ma wymiar długości.

Wartości współczynnika tarcia toczonego μ_T leżą w granicach 10^{-3} - 10^{-5} [m].

Po przekształceniach powyższych wzorów otrzymujemy:

$$F_S = \mu_T \frac{F_N}{r} \quad (20)$$

Im większy promień walca, tym mniejszą siłę trzeba przyłożyć by wywołać jego toczenie.

Dla trzech walców o różnych powierzchniach podstawy (a więc różnych promieniach) rejestrujemy sześciokrotnie kąt α_g , dla którego dany walec stacza się z równi. Pomiarów należy dokonywać z tego samego punktu początkowego (gdzie cylinder pozostaje w spoczynku, gdy kąt $\alpha=0^\circ$). Obliczymy następnie wartość współczynnika tarcia tocznego. Dane umieszczamy w tabeli 3.

Tabela 3.

N ^o	Promień podstawy walca	α_g	μ_T

Uwaga. Dokładność kątomierza jest zbyt mała by wyznaczyć rozsądnie współczynnik tarcia tocznego:

$$\Delta\mu=(rtg\alpha)' \Delta\alpha=r/\cos^2\alpha \Delta\alpha \approx r \Delta\alpha$$

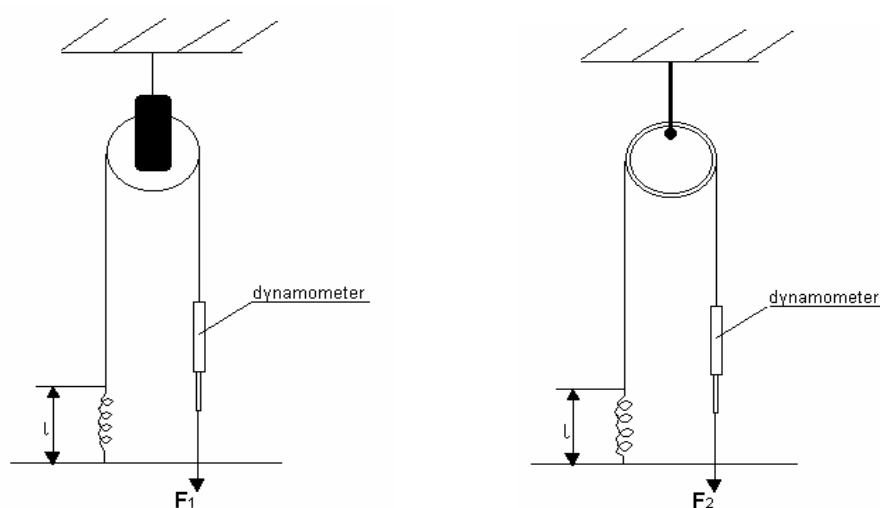
Daje dla walca o promieniu 1cm (0.01m) i niepewności wyznaczenia kąta 1° (0.017rd) dość dużą niepewność $\Delta\mu \approx 0.00017$. Do tego dochodzi niepewność położenia punktu równowagi, który trudno ustalić kątomierzem. Z tej przyczyny warto pomiar kąta wykonać za pomocą linijki, przyłożonej do ruchomego końca deski. Unosimy deskę tak wysoko, by rozpocząć ruch i notujemy wysokość linijki l_1 . Następnie próbujemy obniżyć deskę aby wywołać ruch w stronę przeciwną, notując położenie linijki l_2 . Możemy przyjąć punkt równowagi w środku pomiędzy tymi wysokościami i obliczyć

$$\mu=rtg\alpha=r[l_1-(l_1+l_2)/2]/L$$

gdzie L jest odległością punktu pomiaru linijką od osi obrotu deski.

Część III Wyznaczanie stosunku współczynników tarcia przy toczeniu i ślizganiu

Demonstracja różnicy między tarciem przy **toczeniu** i **ślizganiu** może zostać przeprowadzona za pomocą następującego zestawu:



Rys.4 Demonstracja różnicy tarcia przy toczeniu i ślizganiu

Korzystając z powyższego zestawu możemy zaobserwować różnice pomiędzy tarciem tocznym, a poślizgu. W tym celu należy rozciągnąć sprężynę na długość l_1 , mierząc równocześnie dynamometrem siłę pozwalającą na to rozciągnięcie l_1 . W przypadku a) siła F_1 (z blokadą) i w przypadku b) F_2 (bez blokady), jak na rys. 4. Powyższą procedurę należy powtórzyć dla rozciągnięcia sprężyny l_2 i l_3 . Pomiarów dokonujemy sześciokrotnie.

Wyznaczamy stosunek współczynników tarcia przy toczeniu i ślizganiu oraz współczynnika sprężystości sprężyny (rys.4). Wyniki umieszczamy w tabeli 4.

Tabela 4.

Rozciągnięcie sprężyny	k	F_1	F_2	$\frac{F_1}{F_2}$
l_1				
l_2				
l_3				

Wyniki, obliczenia i analiza błędów

Dla danych zawartych w tabelach obliczamy wartości średnie: μ_s , μ_k i μ_T . Następnie przeprowadzamy analizę błędów, obliczając odchylenie standardowe.

Końcowy wynik należy podać w postaci:

$$\mu_k, \mu_T, \mu_s = \bar{\mu} \pm S_{\bar{\mu}} \quad (21)$$

Pytania

1. Co to jest tarcie?
2. Jakie siły występują w zjawisku tarcia?
3. Dlaczego tarcie nie zależy od wielkości powierzchni A?
4. Opisz zjawisko tarcia na poziomie mikroskopowym.
5. Czy „idealnie” gładka powierzchnia nie wykazuje tarcia?
6. Czy można podgrzewając powierzchnię kontaktu dwóch ciał spowodować ruch jednego z nich?
7. Jaka siła tarcia działa na nieruchomy przedmiot?
8. Wyprowadzić wzór na współczynnik tarcia kinetycznego, statycznego i tocznego.
9. Co jest przyczyną tarcia tocznego?
10. Jakie warunki muszą być spełnione, żeby zaobserwować zjawisko poślizgu?

Literatura

1. S.Szczeniowski, *Fizyka Doświadczalna, Część I, Mechanika i Akustyka*, PWN, Warszawa, 1980, str. 137-156.
2. J.Orear, *Fizyka, Tom I*, PWN, Warszawa, 1980, str. 62-65.
3. Douglas C.Giancoli, *Physics for Scientist & Engineers*, Prentice Hall, 2000