

# Poznajemy właściwości tarcia. Część III: Przyczyny i osobliwości tarcia

Stanisław *BEDNAREK*

W poprzednich dwóch kącikach eksperymentatora przedstawiony został szereg doświadczeń dających odpowiedź na pytanie, od czego zależy wartość siły tarcia oraz jak wyznaczyć jego współczynniki. Teraz spróbujemy krótko wyjaśnić, co jest przyczyną tarcia, oraz poznać jego niezwykle właściwości. Do dzisiejszych doświadczeń potrzebne nam będą dwie płytki szklane o rozmiarach kilku centymetrów, kij od szczotki lub stalowy pręt o długości 1–1,5 m i średnicy ok. 10 mm, dwie dość grube książki, najlepiej o zbliżonym formacie i liczbie kartek, gumka aptekarska, grzebień lub listewka, klamka w drzwiach oraz dostęp do załadowanej taczki ogrodowej.

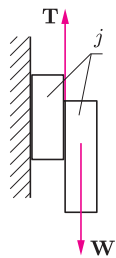
Tarcie bywa szkodliwe i powoduje niszczenie stykających się ze sobą ruchomych powierzchni. Z powodu tarcia pojawia się większość dziur w naszych ubraniach, zużywają się opony samochodowe, części maszyn i inne trące się elementy. Tarcie bywa również pożyteczne. Gdyby nie było tarcia, to m.in., zgodnie z pierwszą zasadą dynamiki Newtona, trudno byłoby zatrzymać poruszające się ciało.

Dział nauki zajmujący się teoretycznymi i doświadczalnymi badaniami tarcia nazywa się *trybologią*. Jest to dziedzina interdyscyplinarna, korzystająca z osiągnięć fizyki, chemii oraz nauk technicznych. Badacze zajmujący się trybologią budują modele teoretyczne i weryfikują je eksperymentalnie w celu ilościowego wyjaśnienia prawidłowości rządzących tarcie w różnych sytuacjach. Mimo że początki trybologii sięgają okresu odrodzenia, to dziedzina ta, mająca cały czas ogromne znaczenie praktyczne, nadal się intensywnie rozwija.

Przekonaliśmy się już doświadczalnie, że w przypadku powierzchni chropowatych siła tarcia ma, przy tym samym nacisku, większą wartość niż w przypadku powierzchni gładkich. Można by więc przypuszczać, że jeżeli bardzo dokładnie wygładzimy stykające się powierzchnie ciała, to tarcie będzie minimalne lub zniknie zupełnie. Okazuje się jednak, że jest inaczej. W miarę wygładzania stykających się powierzchni tarcie rzeczywiście początkowo maleje, ale później wzrasta. Dlaczego tak się dzieje? Przyczyną tego są siły międzycząsteczkowe, nazywane w tym przypadku siłami przylegania lub inaczej adhezji, które zaczynają mieć istotne znaczenie przy bardzo bliskim kontakcie między powierzchniami ciała. Powodują one przyciąganie się tych ciał. Żeby pokonać to przyciąganie, potrzeba podczas ruchu dodatkowej siły, co przejawia się jako wzrost tarcia. Niekiedy jest to wzrost wielokrotny. Do dokładnych pomiarów warsztatowych używane są bardzo gładkie płytki stalowe, nazywane płytkami wzorcowymi lub płytkami Johanssona. Po ich złożeniu trudno jest przesunąć jedną płytkę względem drugiej, a siły przylegania między nimi są tak duże, że jedna płytka nie odpada od drugiej pod własnym ciężarem. Ważne jest przy tym, żeby powierzchnie płytek były suche i czyste.

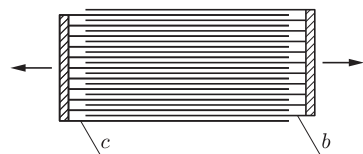
Zapewne nie będziemy mieli dostępu do płytek Johanssona, ale możemy spróbować sprawdzić te efekty przy użyciu dwóch płytek szklanych, składając je gładkimi powierzchniami i dociskając (rys. 1). Jako ciekawostkę warto też dodać, że w przypadku przesuwania po sobie dwóch bardzo gładkich i czystych płytek stalowych umieszczonych w próżni, współczynnik tarcia może dochodzić nawet do 100! W ten sposób wyjaśniliśmy przyczynę niewiarygodnie dużej wartości współczynnika tarcia wspomnianej w poprzednim odcinku. Siła tarcia między starannie wygładzonymi powierzchniami wzrośnie jeszcze bardziej, gdy posmarujemy je cieczą zwilżającą te powierzchnie – w przypadku płytek szklanych lub metalowych może to być woda. Pojawia się wówczas dodatkowe siły przylegania, zwiększające tarcie. Warto sprawdzić to doświadczalnie. Zamiast płytek szklanych można użyć łatwiej dostępnych gładkich płytek z tworzywa sztucznego, także zwilżonych wodą.

Jak duża może być wartość siły tarcia przy bardzo niewielkiej wartości siły nacisku, możemy przekonać się, używając dwóch książek. W tym celu książki umieszczamy tuż obok siebie na stole i wkładamy kartki jednej z nich pomiędzy kartki drugiej w sposób pokazany na rysunku 2. Jeżeli brak nam cierpliwości, to nie musimy przekładać pojedynczych kartek – możemy wkładać je, na przykład, po pięć. Po przełożeniu kartek każdą z książek chwytną jedną ręką w pobliżu grzbietu i, ciągnąc je w przeciwną stronę wzdłuż tej samej prostej, próbujemy wysunąć jedną książkę z drugiej. Okazuje się to niemożliwe. Do wysunięcia książek możemy nawet zaangażować dwie osoby (fot. 1) – również sobie z tym nie poradzą. To efektowne doświadczenie udaje się także



Rys. 1. Siła tarcia  $T$  między dwiema gładkimi płytkami szklanymi  $j$  może być tak duża, że nie opadają one pod własnym ciężarem  $W$ .

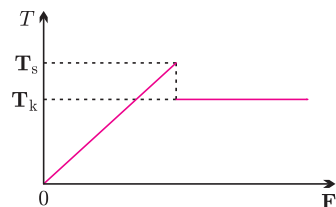
Więcej na temat trybologii można przeczytać w artykule Przemysława Borysa *Skąd się bierze tarcie?*, Foton 106/2009, s. 4–26.



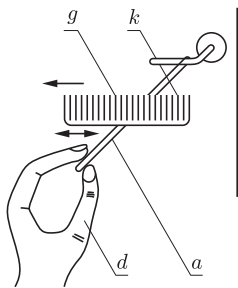
Rys. 2. Sposób przełożenia kartek dwóch książek w celu badania siły tarcia;  $b$ ,  $c$  – książki.



Fot. 1. Siły tarcia między kartkami dwóch książek okazują się tak duże, iż dwie dorosłe osoby nie są w stanie wyciągnąć jednej książki z drugiej.



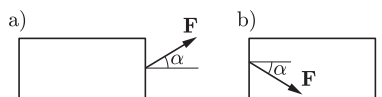
Rys. 3. Zależność wartości siły tarcia  $T$  od przyłożonej siły zewnętrznej  $F$ ;  $T_s$  – siła tarcia statycznego,  $T_k$  – siła tarcia kinetycznego.



Rys. 4. Prosty sposób zbadania wpływu różnic wartości siły tarcia statycznego i kinetycznego na wytwarzanie drgań relaksacyjnych i dźwięków; *k* – kłamek, *g* – grzebień, *a* – gumka aptekarska, *d* – dłoń.



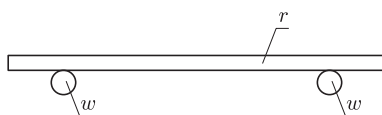
Fot. 2. Przykład wykonania doświadczenia przedstawionego schematycznie na rys. 4.



Rys. 5. Różne sposoby wprawienia w ruch ciężkiego ciała: a) przez ciągnięcie, b) przez pchanie; *F* – przyłożona siła,  $\alpha$  – kąt nachylenia kierunku siły do poziomu.



Fot. 3. Wprawianie w ruch ciężkiej skrzyni do badania tarcia w Ogrodzie Doświadczeń im. Stanisława Lema w Krakowie.



Rys. 6. Sposób przeprowadzenia intrygującego doświadczenia, wykazującego wpływ siły nacisku na siłę tarcia; *r* – pręt, *w* – palec wskazujący.

z książkami o różnych formatach i grubościach. Warto także zbadać wpływ liczby przekładanych jednorazowo kartek (np. zwiększając ją do 10 czy 20) oraz ich formatu na wartość siły potrzebnej do wysunięcia książek. To doświadczenie pokazuje, jak duża może być wartość siły tarcia spowodowana przyleganiem oraz że decydujący wpływ na tę wartość ma powierzchnia styku ciał.

Doświadczenia przeprowadzone przed miesiącem, polegające na wprawianiu w ruch kartoników ciągniętych siłomierzem lub leżących na równi pochyłej, prowadzą do wniosku, że siła tarcia statycznego wzrasta od zera do pewnej wartości maksymalnej, charakterystycznej dla danych dwóch powierzchni. Wzrost ten zachodzi liniowo wraz ze zwiększeniem wartości siły zewnętrznej, która chce wprawić ciało w ruch (rys. 3). Po przekroczeniu tej maksymalnej wartości ciało zaczyna się poruszać, a tarcie przechodzi skokowo ze statycznego w słabsze, kinetyczne. Dlatego też podczas ruszania pojazdów, np. pociągu, odczuwamy niewielkie szarpnięcia. Podobna sytuacja ma miejsce tuż przed zatrzymaniem pojazdu.

Przystąpimy teraz do doświadczenia pozwalającego zbadać opisaną prawidłowość. Jeden koniec gumki aptekarskiej zaczepiamy za jakiś stały uchwyt. Najłatwiej wykorzystać do tego kłamek zamkniętych drzwi (rys. 4). Swobodny koniec gumki chwytnymi palcami i lekko ją naprężamy w pozycji poziomej. Do drugiej ręki bierzemy grzebień, naciskamy lekko jego grzbietem na gumkę i powoli przesuwamy w kierunku do niej prostopadłym (fot. 2). Widzimy, że przy przesuwaniu grzebienia gumka lekko się rozciąga w kierunku jego ruchu, a następnie szybko wraca do prostoliniowego kształtu i zmiany te powtarzają się. Możemy również usłyszeć towarzyszący tym zmianom cichy dźwięk. Zamiast grzebienia można użyć listewki. Warto również sprawdzić, czy siła nacisku na gumkę, jej naprężenie i szybkość przesuwania grzebienia lub listewki mają wpływ na wielkość odchyżeń gumki i częstotliwość wydawanego dźwięku.

Zaobserwowany efekt wykorzystywany jest w czasie gry na instrumentach smyczkowych. Muzyk przesuwający smyczek po strunach powoduje ich niewielkie rozciągnięcie w wyniku tarcia smyczka o struny. Wartość siły potrzebnej do rozciągnięcia struny jest wprost proporcjonalna do jej odkształcenia i może wzrastać prawie liniowo, aż do zerwania struny. Siła tarcia może wzrosnąć tylko do maksymalnej wartości, która jednak w pewnym momencie okazuje się za małą do dalszego rozciągania struny. Wtedy struna wraca do położenia równowagi, wykonując przy tym pewną liczbę drgań, które słyszymy jako dźwięki. Dla zwiększenia tarcia i poprawy brzmienia dźwięków smyczki naciera się kalafonią.

Z życia codziennego wiemy, że w celu przesunięcia ciała możemy je pchać lub ciągnąć. Dysponujemy przy tym ograniczoną siłą i zwykle przykładamy ją pod pewnym kątem do poziomu (rys. 5). Między przesuwanym ciałem a podłożem występuje tarcie. W takiej sytuacji spróbujmy przewidzieć, którym sposobem – pchaniem czy ciągnięciem – łatwiej będzie nam wprawić w ruch ciężkie ciało? Pouczające doświadczenie, polegające na przesuwanie ciężkiej skrzyni przy dużym tarcu drewnianego dna skrzyni i granitowej kostki, można wykonać w Ogrodzie Doświadczeń im. Stanisława Lema w Krakowie (fot. 3), gdzie zwiedzający mają możliwość przeprowadzić kilkadziesiąt interesujących doświadczeń prawie ze wszystkich działów fizyki ([www.ogroddoswiadczen.pl](http://www.ogroddoswiadczen.pl)). Jeżeli ktoś na razie nie wybiera się do Krakowa, to dobrym sprawdzianem naszych przewidywań, czy skuteczniejsze jest ciągnięcie czy pchanie, będzie użycie załadowanej taczki ogrodowej.

Na zakończenie warto przeprowadzić jeszcze jedno intrygujące doświadczenie, w którym tarcie odgrywa dyskretną, ale decydującą rolę. Weźmy kij od szczotki lub inny pręt o długości ok. 1–1,5 m. Ważne, żeby pręt był prosty i dość ciężki. Wyciągnijmy poziomo przed siebie lekko rozchylone obie ręce i wyprostujmy palce wskazujące (rys. 6). Palce te powinny być odległe o ok. 0,8–1 m. Pozostałe palce należy zgiąć do wnętrza dłoni. Skorzystajmy z pomocy innej osoby, która położy nam pręt na palcach wskazujących tak, żeby jego końce wystawały tyle samo na boki. Przesuńmy teraz powoli jedną rękę o kilka centymetrów w kierunku drugiej. Co zauważamy? Jak zachował się pręt? Przesuńmy następnie drugą rękę. Co w tym przypadku dzieje się z prętem? Jakie położenie zajmie pręt po kilkakrotnym wykonaniu opisanych czynności? Dlaczego tak się dzieje? Żeby ułatwić wyjaśnienie tych efektów, podpowiemy, że trzeba tu zwrócić uwagę na zależność siły tarcia od siły nacisku. Należy też zastanowić się, jak zmieniają się siły nacisku pręta na palce podczas zbliżania rąk. W celu określenia sił nacisku na palce pręt można traktować jako dźwignię jednostronną.

Za miesiąc również zajmijmy się tarcie, ale będzie to tarcie podczas ruchu w płynach, czyli w cieczach i gazach.