



**ĆWICZENIE
110**

MECHANICZNY RÓWNOWAŻNIK CIEPŁA

Cel ćwiczenia: porównanie pracy mechanicznej ze wzrostem energii wewnętrznej – wyznaczenie mechanicznego równoważnika ciepła; wyznaczanie ciepła właściwego glinu i mosiądzu przy założeniu równoważności pracy mechanicznej i ciepła.

Zagadnienia: mechaniczny równoważnik ciepła, pierwsza zasada termodynamiki, praca mechaniczna, energia wewnętrzna, ciepło właściwe, prawo stygnięcia.

1 Wprowadzenie

Określenie mechanicznego równoważnika ciepła w 1842 wprowadził Julius Robert von Mayer. W historii nauki mechaniczny odpowiednik ciepła stwierdza, że ruch i ciepło są wzajemnie wymienne i że w każdym przypadku dana ilość pracy wytworzyłaby taką samą ilość ciepła, pod warunkiem, że wykonana praca zostanie całkowicie zamieniona na energię cieplną. Mechaniczny ekwiwalent ciepła był koncepcją, która odegrała ważną rolę w rozwoju i akceptacji zasady zachowania energii oraz ustanowieniu nauki o termodynamice w XIX wieku [Wikipedia].

Niezależne od siebie rozważania i obserwacje J. Mayera oraz eksperymenty Jamesa Joule’a doprowadziły do sformułowania I zasady termodynamiki w obecnej postaci. Wcześniej ciepło było traktowane jako zupełnie odrębna wielkość fizyczna. Uznanie ciepła jako innego niż praca sposobu zmiany energii doprowadziło w naturalny sposób do włączenia ciepła, jako formy przekazywania energii, do zasady zachowania energii.

Sformułowaniem zasady zachowania energii dla układów termodynamicznych jest pierwsza zasada termodynamiki – jedno z podstawowych praw termodynamiki. Zasada stanowi podsumowanie równoważności ciepła i pracy oraz stałości energii układu izolowanego. Dla układu zamkniętego (nie wymienia masy z otoczeniem, może wymieniać energię) zasadę można sformułować w postaci:

$$\Delta U = Q + W, \quad (1)$$

czyli zmiana energii wewnętrznej układu zamkniętego jest równa energii, która przepływa przez jego granice na sposób ciepła i pracy.

Wymiana ciepła (transport ciepła) jest, obok pracy, jednym ze sposobów przekazywania energii pomiędzy układami termodynamicznymi. Wymiana ciepła zawsze przebiega z ciała o temperaturze wyższej do ciała o temperaturze niższej, zgodnie z drugą zasadą termodynamiki. Jeżeli rozpatrywany obiekt ma inną temperaturę niż jego otoczenie lub znajdujące się w pobliżu inne ciała, wymiana ciepła odbywać się będzie do momentu osiągnięcia stanu równowagi termicznej. Wymiana ciepła zachodzi na jeden z trzech sposobów:

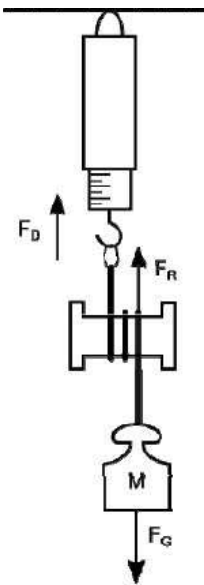
- przewodzenie ciepła – polega na przekazywaniu energii przez bezładny ruch cząsteczek i ich zderzenia,
- konwekcja (unoszenie ciepła) na skutek przemieszczania się masy substancji,
- promieniowanie cieplne – polega na przenoszeniu energii przez promieniowanie elektromagnetyczne emitowane w wyniku cieplnego ruchu cząsteczek.

2 Zasada pomiaru i układ pomiarowy

Podczas tego eksperymentu kręcąc cylindrem wykonujemy pracę przeciwko sile tarcia F_R działającej pomiędzy cylindrem a taśmą z tworzywa sztucznego powodując tym samym wzrost energii wewnętrznej cylindra mierzony poprzez wzrost jego temperatury (rys. 1). Przy założeniu równoważności pracy mechanicznej i ciepła, w kolejnej części, wyznaczamy ciepło właściwe materiału cylindra (np. glinu, mosiądzu).

Stosunek wykonanej pracy mechanicznej W do wartości wygenerowanego ciepła Q zwany jest mechanicznym równoważnikiem ciepła R :

$$R = W/Q. \quad (2)$$



Rys. 1. Rozkład sił w układzie: F_R – siła tarcia, F_D – siła naciągu i F_G – siła ciężkości działająca na ciężarek o masie M .

W czasie szybkiego obracania korbą ciężarek M pozostaje nieruchomy, więc siła ciężkości F_G na niego działająca musi być równoważona poprzez sumę siły tarcia F_R i siły naciągu F_D . Stąd możemy wyznaczyć wartość siły tarcia:

$$F_R = F_G - F_D. \quad (3)$$

Wartość siły naciągu F_D odczytujemy bezpośrednio na siłomierzu. Pracę wykonaną przeciwko sile tarcia podczas n obrotów cylindra o średnicy d możemy zatem wyznaczyć z definicji pracy mechanicznej jako iloczyn „pokonanej” drogi i przyłożonej siły:

$$W = \pi d n F_R = \pi d n (F_G - F_D) = \pi d n (M g - F_D). \quad (4)$$

Podczas przesuwania się po cylindrze taśmy syntetycznej praca mechaniczna przekształca się w ciepło Q i temperatura cylindra zwiększa się o ΔT :

$$Q = C_{\text{całkowita}} \Delta T, \quad (5)$$

gdzie $C_{\text{całkowita}}$ oznacza całkowitą pojemność cieplną układu składającego się z cylindra, taśmy termometru, pasty przewodzącej i otaczającego cylinder powietrza (i założeniu, że cylinder jest dobrze odizolowany od układu z korbą). Pojemności cieplne wymienionych elementów poza cylindrem są niewielkie i pominiemy je w naszych obliczeniach. Ciepło obliczymy więc z zależności:

$$Q = C_{\text{cyl}} \Delta T, \quad (6)$$

gdzie C_{cyl} jest pojemnością cieplną cylindra (CuZn, Al) i można ją wyznaczyć znając ciepło właściwe materiału cylindra. Ostateczne wyrażenie na ciepło ma więc postać:

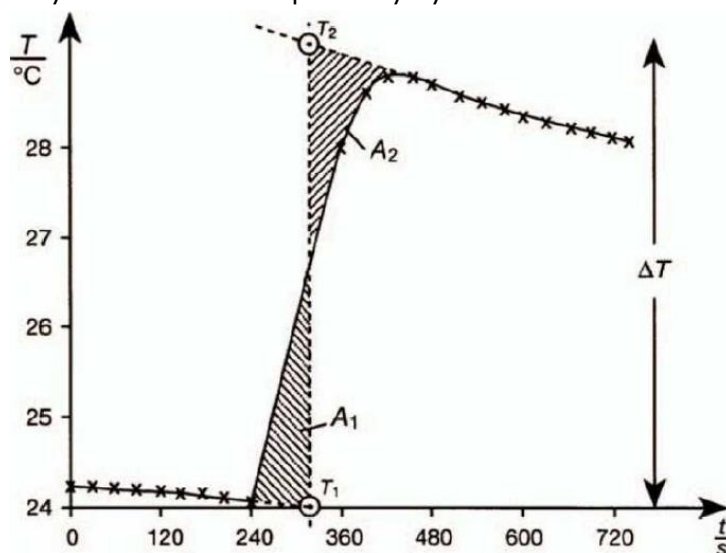
$$Q = c_{\text{cyl}} m_{\text{cyl}} \Delta T. \quad (7)$$

Do sprawdzenia wartości mechanicznego równoważnika ciepła potrzebujemy więc określić wzrost temperatury cylindra po wykonaniu określonej ilości obrotów.

Znając wartość mechanicznego równoważnika ciepła można z analogicznego doświadczenia wyznaczyć ciepło właściwe materiału, z którego wykonany jest cylinder. Ponieważ, zgodnie z prawem zachowania energii, całkowita ilość energii mechanicznej musi zostać przekształcona w jednakową wartość energii wewnętrznej – mechaniczny równoważnik ciepła wynosi 1. Przekształcając równania (2), (4) i (7) otrzymujemy wzór na ciepło właściwe materiału, z którego wykonany jest cylinder:

$$c_{cyl} = \frac{\pi d n (Mg - F_D)}{m_{cyl} \Delta T}, \quad (8)$$

gdzie ΔT jest wyznaczonym wzrostem temperatury cylindra.



Rys. 2. Przykładowy wykres zmian temperatury T w czasie eksperymentu.

Przykładowy wykres $T(t)$ przedstawia rys. 2. Podczas obrotów cylindra energia jest do niego przekazywana lecz także częściowo oddawana do otoczenia – cylinder stygnie (głównie) w wyniku konwekcji. Czyli temperatura, którą cylinder osiąga jest niższa od tej jaką powinien mieć po przyjęciu całej energii wynikającej z wykonanej pracy mechanicznej. Ten skomplikowany proces spróbujemy przybliżyć korzystając z prawa stygnięcia (Newtona), które mówi, że: „Szybkość z jaką układ stygnie jest proporcjonalna do różnicy temperatur pomiędzy układem a otoczeniem”. Utracone ciepło oznaczone jest na wykresie jako zakreskowane pola. Rzeczywistą zależność uwzględniającą stygnięcie oznaczono na wykresie linią ciągłą. Linią przerywaną oznaczono „natychmiastową” zmianę temperatury cylindra – bez utraty ciepła. W obu przypadkach cylinder ma taką samą energię wewnętrzną na początku i na końcu eksperymentu. Aby obliczyć wzrost temperatury ΔT musimy wyznaczyć temperatury T_2 i T_1 . Temperatury te odpowiadają punktom przecięcia liniowo interpolowanych zależności $T(t)$ przed wykonaniem pracy (T_1) i po wykonaniu pracy (T_2) z pionową linią (przerywana na rys. 2) oznaczającą „natychmiastowe” podgrzanie cylindra. Konstrukcja linii pionowej jest taka, że zakreskowane pola A_1 i A_2 muszą być takie same.

3 Zadania do wykonania

- zważyć wszystkie cylindry, zmierzyć ich średnicę d ,
- zamocować w urządzeniu wybrany cylinder a na statywie zamocować odpowiedni siłomierz,
- opleść taśmę tarcia wokół cylindra 2 razy (patrz rys. 1) w taki sposób, że gdy korba jest przekręcana zgodnie z kierunkiem ruchu wskazówek zegara siłomierz jest luzowany – zmniejsza się naciąg; u dołu taśmy zamocuj dobrany odważnik,

- w celu pomiaru temperatury należy umieścić w otworze znajdującym się w cylindrze termometr lub miernik temperatury (aby polepszyć kontakt termiczny otwór w cylindrze należy wypełnić pastą przewodzącą) - ponieważ cylinder będzie się obracał należy zwrócić szczególną uwagę na dokładne i centralne zamocowanie termometru,
- włączyć stoper i co 30 s przez 4 min odczytywać temperaturę,
- kontynuując pomiar czasu ok. 200 razy obróć korbą, jak najszybciej i jak najbardziej regularnie, zgodnie z kierunkiem ruchu wskazówek zegara,
- w czasie obracania korbą z siłomierza należy odczytać siłę F_D ,
- po wykonaniu określonej liczby obrotów kontynuuj odczyt temperatury w odstępach 30 s, tak aby całkowity czas pomiaru osiągnął 12 do 15 minut.

4 Opracowanie wyników

Opisana powyżej procedura dotyczy tak sprawdzenia wartości mechanicznego równoważnika ciepła jak i wyznaczenia ciepła właściwego materiału cylindra. W obydwu przypadkach należy wyznaczyć wzrost temperatury ΔT cylindra po wykonaniu pracy. Niezbędne do tego jest wykonanie wykresu temperatury T ($^{\circ}\text{C}$) od czasu t (s). Sposób wyznaczenia wartości ΔT opisany jest w punkcie 2.

Wstawiając wartości wyznaczone z zależności (4) i (7) do równania (2) wyznaczamy mechaniczny równoważnik ciepła.

Korzystając z zależności (8) wyznaczamy ciepło właściwe materiału, z którego wykonano cylinder.

Należy pamiętać o wyznaczeniu niepewności wszystkich parametrów pośrednich i wartości końcowych.

4 Pytania

- Co to jest ciepło?
- Jak może zachodzić wymiana ciepła?
- Co to jest mechaniczny równoważnik ciepła?
- Sformułuj I zasadę termodynamiki.
- Co to jest ciepło właściwe?
- Co to jest pojemność cieplna?
- O czym mówi prawo stygnięcia Newtona?

Autor

dr Piotr Sitarek