

7. OBIEG TERMODYNAMICZNY

7.1. Zamiana ciepła na pracę w silniku cieplnym

Zasada zachowania energii, a jako jej specjalny przypadek w odniesieniu do zjawisk cieplnych – równoważność energii cieplnej i mechanicznej, czyli pierwsza zasada termodynamiki mówi, że bez użycia pewnej ilości ciepła nie jesteśmy w stanie otrzymać pracy i odwrotnie, zużywając pracę – wywiązujemy ciepło.

Między tymi jednak dwoma zjawiskami, odwrotnymi względem siebie, zachodzi głęboka różnica. Jeżeli pewien zasób energii mechanicznej L , z zachowaniem ostrożności mających na celu uniknięcie rozpraszania ciepła w formie przewodzenia, promieniowania itp., da się zamienić całkowicie na ciepło i ilościowo otrzymamy $Q = L$ ciepła, to zjawisko odwrotne odbywa się w nieco odmiennych warunkach. Mianowicie, jeżeli w jakimś układzie cieplnym zachodzą specjalne termodynamiczne warunki umożliwiające w ogóle zamianę ciepła na pracę, co nie zawsze ma miejsce, to zużywając

$$Q = Q_1 + Q_2$$

ciepła zdołamy zamienić na pracę, mimo wszelkich zabiegów, zaledwie część tej ilości, np. Q_1 , otrzymując tylko

$$L = Q_1;$$

reszta, tj. Q_2 , jest dla tej zamiany stracona – pozostaje wprawdzie w formie ciepła, ale nie dającego się już w danym układzie przetworzyć na pracę.

To spostrzeżenie nie obala bynajmniej pierwszej zasady termodynamiki; równoważność pracy i ciepła swą moc utrzymuje, gdyż przy przemianie ciepła na pracę zniknie w układzie dokładnie tyle ciepła, ile otrzymanej zostało pracy, ale jednocześnie część ciepła, nie zamieniwszy się na pracę, ujdzie do źródła dolnego jako ciepło z obniżoną temperaturą (np. spaliny).

Tak więc chcąc otrzymać drogą przemian termodynamicznych pewną ilość pracy L musimy doprowadzić nie tylko równoważną temu ilość ciepła $Q_1 = L$, ale poza tym jeszcze ilość ciepła Q_2 , tzn. musimy doprowadzić

$$Q = Q_1 + Q_2,$$

choć ilość ciepła Q_2 nie bierze udziału w istotnej przemianie.

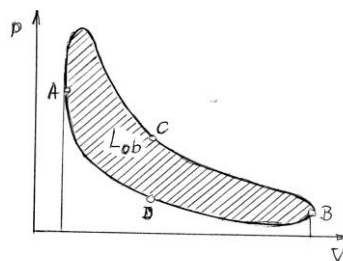
Układ fizyczny, który w pewnych warunkach jest w stanie zamienić część ciepła na pracę w sposób ciągły, nazywa się silnikiem cieplnym.

W silnikach cieplnych, do tego, by one mogły dostarczać pracę, należy przenieść pewną ilość ciepła z ciała gorętszego na zimniejsze. Chociaż posiadamy dwa zbiorniki czy źródła ciepła o różnych temperaturach, to przy bezpośrednim zetknięciu się ciepło przejdzie z ciała cieplejszego na zimniejsze bez zamiany na pracę i nastąpi tylko nieodwracalne zjawisko wyrównania temperatur (przewodnictwo). Chcąc ciepło zamienić na pracę należy ciepło ze źródła górnego do dolnego przeprowadzić przy pośrednictwie czynnika, czyli ciała czynnego (gaz, para) w silniku, otrzymując wymuszoną przemianę, podczas której ciepło zamieniamy na pracę. Osiąga się to w silniku poddając czynnik termodynamiczny okresowym zmianom stanu. Dzięki kolejnemu rozprężaniu się i kurczeniu się czynnika jest wykonywana praca, przy czym na końcu każdego okresu czynnik wraca do stanu wyjściowego, czyli podlega obiegowi. Praca otrzymywana przy rozprężaniu się czynnika nie może być całkowicie zużyta przy sprężaniu do stanu wyjściowego, bo wówczas silnik nie oddawałby pracy na zewnątrz, aby więc podczas obiegu mogła być oddana praca, musi być czynnik chłodzony. Tak więc stałe otrzymywanie pracy z silnika wymaga dostarczania ciepła ze źródła górnego czyli grzejnicy (np. komora spalania silnika spalinowego) podczas rozprężania się czynnika i oddawania ciepła do źródła dolnego czyli chłodnicy (np. atmosfera) przy jego sprężaniu.

7.2. Obieg silnikowy na wykresie pracy i na wykresie ciepła

Obiegi termodynamiczne są przedstawiane na wykresie pracy p, V (rys. 7.1) oraz na wykresie ciepła T, S (rys. 7.2). Na obu wykresach każdemu obiegowi odpowiada krzywa zamknięta. W układzie p, V (wykres pracy) jest to krzywa zamknięta $ACBD$ (rys.7.1).

Obieg przedstawiony na rys. 7.1 i 7.2 będzie obiegiem silnikowym, jeśli tworzące go przemiany będą odbywały się w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek zegara czyli w prawo.



Rys. 7.1. Obieg termodynamiczny w układzie pracy

Odcinek krzywej od A do B poprzez C przedstawia rozprężanie; odcinek zaś krzywej od B do A poprzez D jest sprężaniem. Podczas rozprężania praca L_1 (pole pod krzywą ACB oparte na osi V

– praca dodatnia) jest oddawana na zewnątrz. Podczas sprężania należy włożyć pracę L_2 (pole pod krzywą BDA oparte na osi V – praca ujemna). Różnica obu prac

$$L_{ob} = L_1 - |L_2|$$

jest pracą oddaną na zewnątrz w czasie jednego obiegu. Praca obiegu odwracalnego jest zatem równa polu zamkniętemu wewnątrz krzywych przemianowych w układzie p, V .

Równanie pierwszej zasady termodynamiki dla przemiany niekołowej między stanem 1 (początkowym) i 2 (końcowym) ma postać:

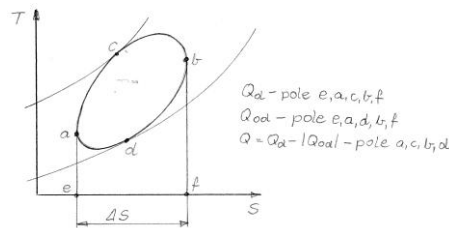
$$Q_{1-2} = U_2 - U_1 + L_{1-2}$$

Gdy przejdzie się do obiegu (przemiana kołowa) to stany 1 i 2 są identyczne. Wówczas $U_2 = U_1$ i składnik $(U_2 - U_1)$ w ostatnim równaniu odpadnie. Ciepło Q_{1-2} jest algebraiczną całką ciepła doprowadzonego i odprowadzonego w ciągu jednego obiegu. Wygodnie jest rozłożyć je na dwie części, jedną dodatnią tzn. ciepło doprowadzone Q_d i drugą ujemną tj. ciepło odprowadzone Q_{od} . Pierwsza zasada termodynamiki dla obiegu ma więc postać równania:

$$L_{ob} = Q = Q_d - |Q_{od}|$$

A zatem, praca obiegu jest równa różnicy między ciepłem doprowadzonym i odprowadzonym.

W układzie T, S (wykres ciepła) (rys. 7.2) każdemu obiegowi odpowiada krzywa zamknięta a, c, b, d . Powierzchnia pod linią a, c, b oparta o oś S jest równa ciepłu doprowadzonemu do obiegu Q_d (ciepło dodatnie) a powierzchnia pod linią b, d, a oparta o oś S jest równa ciepłu odprowadzonemu z obiegu Q_{od} (ciepło ujemne).



Rys. 7.2. Obieg termodynamiczny w układzie ciepła

Pole wewnątrz krzywej zamkniętej $acbd$ na wykresie ciepła (rys. 7.2) przedstawia różnicę ciepła doprowadzonego do obiegu Q_d i ciepła odprowadzonego z obiegu Q_{od} i wynosi

$$Q = Q_d - |Q_{od}|$$

A zatem jest to ciepło zamienione na pracę obiegu L_{ob}

$$L_{ob} = Q$$

7.3. Sprawność cieplna dowolnego obiegu silnikowego

Główną miarą jakości działania silnika cieplnego jest sprawność cieplna. Określa się ją jako stosunek ciepła zamienionego na pracę do całej ilości ciepła doprowadzonego

$$\frac{Q_d - |Q_{od}|}{Q_d} = 1 - \frac{|Q_{od}|}{Q_d} = \frac{L_{ob}}{Q_d} = \eta_t$$

Ciepło doprowadzone do obiegu wzdłuż linii a, c, b (rys. 7.2) można zapisać następująco

$$Q_d = \int_a^b T_d \cdot ds$$

przy czym T_d oznacza zmienność temperatury wzdłuż linii a, c, b .

Ciepło odprowadzone z obiegu wzdłuż linii b, d, a (rys. 7.2) można zapisać następująco

$$Q_{od} = \int_b^a T_{od} \cdot ds$$

przy czym T_{od} oznacza zmienność temperatury wzdłuż linii b, d, a .

Średnie temperatury doprowadzenia i odprowadzenia ciepła wynoszą

$$T_{d\acute{s}r} = \frac{\int_a^b T_d \cdot ds}{\Delta S} = \frac{Q_d}{\Delta S}$$

$$T_{od\acute{s}r} = \frac{\int_b^a T_{od} \cdot ds}{\Delta S} = \frac{Q_{od}}{\Delta S}$$

gdzie $\Delta S = S_b - S_a$

Z powyższych zależności otrzymuje się

$$Q_d = T_{d\acute{s}r} \cdot \Delta S$$

$$Q_{od} = T_{od\acute{s}r} \cdot \Delta S$$

Po podstawieniu do zależności na sprawność cieplną otrzymuje się

$$\eta_t = 1 - \frac{T_{od\acute{s}r} \cdot \Delta S}{T_{d\acute{s}r} \cdot \Delta S} = 1 - \frac{T_{od\acute{s}r}}{T_{d\acute{s}r}} \quad (7.1)$$

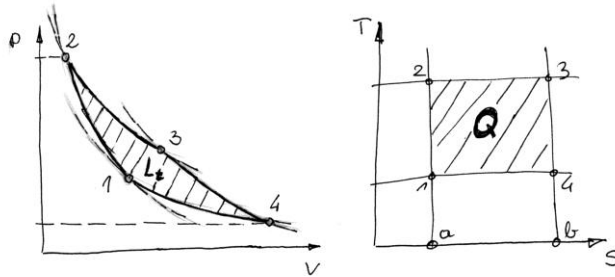
Z powyższej zależności wynika, że sprawność cieplna silnika będzie tym większa im mniejsza będzie średnia temperatura odprowadzenia ciepła oraz im większa będzie temperatura doprowadzenia ciepła.

7.2. Obieg Carnota – najsprawniejszy cieplnie obieg silnikowy

Z zależności (7.1) wynika, że maksymalną sprawność obiegu uzyska się, jeśli średnie temperatury wymiany ciepła staną się temperaturami skrajnymi zakresu w którym jest realizowany obieg. Stanie się to wtedy, gdy ciepło będzie wymieniane w obiegu izotermicznie. Każdy inny obieg, w którym ciepło w tych samych granicach nie będzie wymieniane

izotermicznie będzie cieplnie mniej sprawny. Warunek izotermicznej wymiany ciepła jest spełniony w obiegu Carnota, który tym samym jest najsprawniejszym obiegiem silnikowym w każdym zakresie temperatury.

Obieg Carnota składa się z dwóch izoterm i dwóch izentrop połączonych w ten sposób, że po sprężaniu izentropowym 1-2 następuje rozprężanie izotermiczne 2-3 któremu towarzyszy doprowadzanie ciepła do obiegu, następnie odbywa się rozprężanie izentropowe 3-4. Obieg zamyka sprężanie izotermiczne 4-1, któremu towarzyszy odprowadzanie ciepła.



Rys. 7.3. Obieg Carnota

Obieg Carnota charakteryzuje:

- stopień sprężania (izentropowego):

$$\varepsilon_s = \frac{V_1}{V_2}$$

- stopień rozprężania (izentropowego):

$$\varepsilon_r = \frac{V_4}{V_3}$$

Ponieważ w obiegu Carnota:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3} \quad (7.2)$$

to:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_r = \varepsilon$$

Zależność (7.2) uzyskuje się następująco:

- zapiszemy równanie izentropy sprężania i rozprężania w postaci:

$$\begin{aligned} T_1 \cdot V_1^{k-1} &= T_2 \cdot V_2^{k-1} \\ T_4 \cdot V_4^{k-1} &= T_3 \cdot V_3^{k-1} \end{aligned} \quad (7.3)$$

- w obiegu Carnota relacje pomiędzy temperaturami w charakterystycznych punktach obiegu są następujące (rys. 7.3):

$$T_1 = T_4 = T_0$$

$$T_2 = T_3 = T$$

a po ich uwzględnieniu w równaniach (7.35) i podzieleniu równań stronami otrzymuje się:

$$\frac{V_1}{V_4} = \frac{V_2}{V_3}$$

lub po przekształceniu, zależność (7.23):

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3}$$

Ciepło jest doprowadzone do obiegu w przemianie izotermicznej 2-3 (na wykresie T - S przedstawia je pole a -2-3- b):

$$Q_d = M \cdot R \cdot T_2 \cdot \ln \frac{V_3}{V_2}$$

a odprowadzone z obiegu w przemianie izotermicznej 4-1 (na wykresie T - S przedstawia je pole a -1-4- b):

$$Q_o = M \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln \frac{V_1}{V_4}$$

Ciepło obiegu (na wykresie T - S przedstawia je pole 1-2-3-4):

$$Q = Q_d - |Q_o|$$

Praca obiegu teoretycznego (na wykresie p - V przedstawia ją pole 1-2-3-4):

$$L_t = L_{A2,3} + L_{A3,4} - |L_{A4,1}| - |L_{A1,2}|$$

gdzie:

- $L_{A2,3}$ – praca absolutna wykonana przez gaz (oddana na zewnątrz) w przemianie izotermicznej 2-3:

$$L_{A2,3} = M \cdot R \cdot T_2 \cdot \ln \frac{V_3}{V_2}$$

- $L_{A3,4}$ – praca absolutna wykonana przez gaz (oddana na zewnątrz) w przemianie izentropowej 3-4:

$$L_{A3,4} = \frac{M \cdot R}{1 - k} (T_4 - T_3)$$

- $L_{A4,1}$ – praca absolutna wykonana nad gazem (dostarczona z zewnątrz) w przemianie izotermicznej 4-1:

$$L_{A4,1} = M \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln \frac{V_1}{V_4}$$

- $L_{A1,2}$ – praca absolutna wykonana nad gazem (dostarczona z zewnątrz) w przemianie izentropowej 1-2:

$$L_{A1,2} = \frac{M \cdot R}{1-k} (T_2 - T_1)$$

Zgodnie z I Z.T.:

$$L_t = Q = Q_d - |Q_o|$$

Sprawność teoretyczna obiegu Carnota:

- definicja sprawności:

$$\eta_t = \frac{L_{ob}}{Q_d} = \frac{Q}{Q_d} = \frac{Q_d - |Q_o|}{Q_d} = 1 - \frac{|Q_o|}{Q_d}$$

- dla obiegu Carnota:

$$Q_d = M \cdot T_{\max} \cdot \Delta S$$

$$Q_o = M \cdot T_{\min} \cdot \Delta S$$

stąd:

$$\eta_t = \frac{M \cdot T_{\max} \cdot \Delta S - M \cdot T_{\min} \cdot |\Delta S|}{M \cdot T_{\max} \cdot \Delta S} = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max}} = \frac{\Delta T}{T_{\max}}$$

lub:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}} \quad (7.4)$$

Istotną cechą obiegu Carnota jest niezależność jego sprawności teoretycznej od wielkości powierzchni pracy - rozciągłość granic entropii ΔS nie ma znaczenia dla sprawności. Sprawność zależy tylko od temperatur, przy których jest wymieniane ciepło.

Wykorzystując zapis izentropy sprężania lub rozprężania otrzymuje się inny zapis sprawności teoretycznej obiegu Carnota:

- z równania izentropy (np. sprężania):

$$T_1 \cdot V_1^{k-1} = T_2 \cdot V_2^{k-1}$$

otrzymuje się:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{T_0}{T} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{k-1} = \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{k-1} = \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^{k-1} = \varepsilon^{1-k}$$

a po wstawieniu powyższej zależności do (7.4), otrzymuje się:

$$\eta_t = 1 - \varepsilon^{1-k}$$