

Termodinamiko/Leciono 3

La termodinamikaj ŝanĝiĝoj de la reala gazo kaj la aliĝanta specifa varmo de la gaso

Rilatoj inter la stataj grandoj dum la termodinamikaj ŝanĝiĝoj por la ideala gaso estas tre simplaj ĉar oni konsideras la specifajn varmojn dum la tuta ŝanĝiĝo kiel konstantajn. En ĉi tiu kazo estas eĉ la eksponento n konstanta. Sed en la realeco la specifaj varmoj dependas de la temperaturo:

$$c = a + bt$$

Memkompreneble ankaŭ la kvociento de specifaj varmoj dependas de la temperaturo:

$$\frac{c_p}{c_v} = \kappa$$

$$\kappa = \kappa_0 - \alpha T$$

Post ĉi tiu precizigo de la ekvacioj por la ideala gaso la rilatoj rimarkinde alproksimiĝas al la realeco sed tamen ĉi tie certa neprecizeco restas jam pro tio, ĉar oni ja baziĝas sur la stata ekvacio de ideala gaso.

Varmcikloj kaj cikla varmfikeco

La varmciklo estas la komplekso de kelkaj sinsekvaj procezoj, post kies realigo la labormaterio denove atingas sian komencan elirpunkton.

La varmciklo efektiviĝas dum sia ekspansio sur tuta alia vojo al dum sia kunpremo. La senco de la varmciklo estas en la gajnado de laboro malprofite de varmo, aŭ dum la mala kaj rea procezciklo ĝi estas en la gajnado de varmo malprofite de laboro.

Carnot la unua ekkomprenis la sencon de la varmcikloj (en la jaro 1824).

La laboro estas pergrate desegnita en la $p - r$ diagramo kiel areo, kiu estas la diferenco de areoj de la alkondukita kaj forkondukita varmoj.

La alkondukita varmo estas bildigita per la areo

$$1 - I - 2 - V_2 - V_1 = a_I$$

La forkondukita varmo estas bildigita per la areo

$$2 - II - 1 - V_1 - V_2 = a_{II}$$

Kiam la ciklo realiĝas en la cirkuldirekto de horloĝmontriloj, tiam la suma laboro de la tuta ciklo estas ĉiam pozitiva. La kunpremkurbo de la ciklo kuŝas sub la ekspansia kurbo. Dum la ekspansio oni alkondukas al la gaso la varmon q_1 ; dum la kunpremo oni forkondukas la varmon q_2 . Laŭ la unua termodinamioka teoremo validas la fundamenta ekvacio en sekva formo:

(83)

$$\oint dq = \oint du + \oint pdv$$

\oint la integralo por la tuta fermita ciklo

Kiam la labormaterio revenas en sian komencan elirpunkton, tiam la tuta ŝanĝiĝo de la ena energio egalas al nulo:

$$\oint du = 0$$

kaj el la ekvacio (83) restos:

$$\begin{aligned} \oint dq &= \oint pdv = \oint da + \\ \oint da &= a_0 = a_I - a_{II} \end{aligned}$$

(84)

$$\oint dq = q_1 - |q_2|$$

q_1 – la sumo de ĉiuj alkondukitaj varmoj al unu kilogramo da labormaterio [kJ/kg] q_2 – la sumo de ĉiuj forkondukitaj varmoj al unu kilogramo da labormaterio [kJ/kg]

La varmefikeco

La proporcio de la varmo eluzita por ŝanĝo en la mekanikan laboron al la alkondukita varmo servas por la valorigo de la varmŝanĝa ekonomieco. Oni nomas ĝin – varmefikecon:

(85)

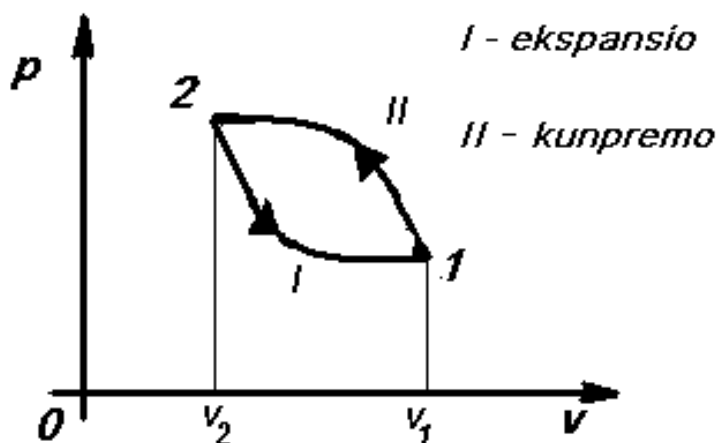
$$\eta = \frac{q_1 - |q_2|}{q_1} = \frac{a_0}{q_1} = 1 - \frac{|q_2|}{q_1}$$

Oni povas ankaŭ el la alkondukita varmo elkalkuli la laboron de unu ciklo:

$$a_0 = \eta_t q_1$$

q_1 – la alkondukita varmo por unu kilogramo da labormaterio dum unu ciklo [kJ/kg] a_0 – la laboro de unu kilogramo da labormaterio efektivigita dum unu ciklo [kJ/kg]

La rea ciklo



Kiam oni realigas ciklon en la rea direkto, tiam la ekspansia laboro estas pli malgranda ol la kunprema. La kunprema kurbo en ĉi tiu kazo kuŝas super la kurbo de la ekspansio. La ciklo realiĝas kontraŭ la cirkuldirekto de horloĝmontriloj desegnite en la $p - v$ diagramo. Ĝia laboro estas negativa, tio signifas, ke oni devas ĝin al la maŝino aldoni. Oni nomas la ciklojn de ĉi tiu speco – reaj cikloj.

La difino de inversaj cikloj

La inversaj cikloj konsistas ekskluzive nur el inversaj procezoj. Kiam estas ili nur unu neinversa procezo, tiam la tuta ciklo iĝas neinversa.

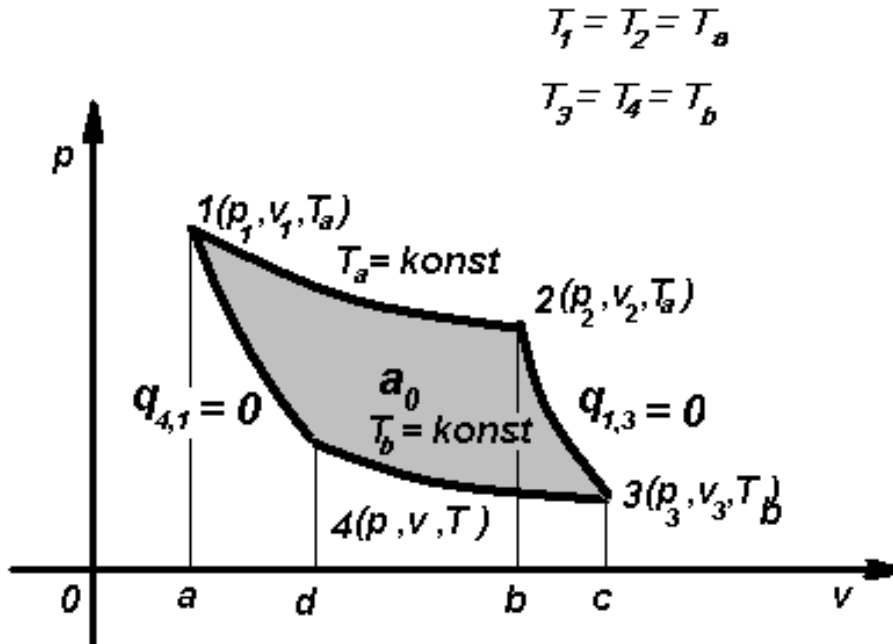
La inversaj procezoj estas tiuj, kiuj okazas dum la senĉesa mekanika kaj varmea ekvilibro. Tio signifas, ke la labormaterio trapasas dum siaj ŝanĝiĝoj nur ekvilibrajn statojn kaj ke ĉiuj procezoj povas okazi kiam ajn ankaŭ en la rea direkto sur la sama vojo, kiu estas bildigita per unu kurbo en la $p - v$ diagramo. Ĉi tiuj ŝanĝoj povas okazi nur tre malrapide prezentante samtempe la ekstremajn procezojn, al kiu oni bedaŭrinde nur klopodas alproksimiĝi.

Sed ekzistas la procezoj, kiuj okazas nur en unu direkto. Tiaj ĉi procezoj, kiuj okazas nur en la frotado, solvado, mkisado, kimikaj ŝanĝoj, ktp. Tio estas la procezojneinversaj. Inter ili estas unu tre grava procezo por la termodinamiko – la varmtransiro de la pli varma korpo al la korpo malpli varma. Ĉi tiu procezo efektiviĝas sen

ekstera helpo tiel longe, ĝis kiam la temperaturo de ambaŭ korpoj ne egaligas.

La ciklo de Carnot

La ciklo de Carnot konsistas el du izotermoj kaj du adiabatataj procezoj. Ĝi estas ideala ciklo, ĉar ĝia procezoj estas nur idealaj kaj samtempe ankaŭ limaj kaj ekstremaj procezoj. La realigo de ĉi tiu ideala ciklo supozas du varmprovizujojn, kies temperaturoj T_a kaj T_b dum la tuta ciklo ne aliĝas.



La ciklo komencas kun la izoterma ekspansio okazanta inter la punktoj 1–2 en la p–v diagramo. Unu kilogramo da laborgaso akceptas la varmon q el la provizujo havanta la pli altan temperaturon T_a . La kondiĉo de la inversecio supozas la saman temperaturon de la laborgaso T_a dum la tuta izoterma ekspansio.

La dua procezo de la ciklo estas la adiabata ekspansio. Oni bildigas ĝin en la p–v diagramo pere de la kurbo inter la punktoj 2–3. Dum la adiabata ekspansio ne okazas la varminterŝanĝo. La laborcilindro devas esti izolita de ambaŭ varmprovizujoj. La gaso realiĝas la laboron nur malprofite de sia ena energio. La temperaturo T_a malpligrandiĝas dum la adiabata ekspansio ĝis la temperaturo T_b .

La tria procezo estas izoterma kunpremo efektiviĝanta laŭ la kurbo inter la punktoj 3–4 en la p–v diagramo. Oni alkondukas al la gaso la laboron, kiu estas egala al la forkondukita varmo dum la konstanta temperaturo T_b . La konstanta temperaturo de la gaso kaj de la varmprovizujo kun la pli malalta temperaturo estas la kondiĉo por la inverzeco de la izoterma procezo kaj tiel ankaŭ de la tuta ciklo.

La kvara procezo estas la adiabata kunpremo, kiu okazas inter la punktoj 4–1 en la p–v diagramo. La kunprema laboro plialtigas la enan energion de la laborgaso. La temperaturo T_b plialtiĝas dum la adiabata kunpremo ĝis la temperaturo T_a .

La diferenco inter la eldonita laboro dum la izoterma kaj adiabata ekspansioj kaj la aldonita laboro dum la izoterma kaj adiabata kunpremoj prezentas la gajnitan laboron de la tuta ciklo. Ĉi tiu laboro egalas al la diferenco de la alkondukita varmo el la provizujo kun la temperaturo T_a kaj de al forkondukita varmo en la provizujon kun la temperaturo T_b .

(86)

$$a_0 = q_1 - q_2$$

a_0 – la laboro gajnita per la ciklo, kJ/kg q_1 – la varmo aldonita dum la izoterma ekspansio, kJ/kg q_2 – la varmo forprenita dum la izoterma kunpremo, kJ/kg

Alkondukita varmo dum la izoterma ekspansio (1-2) estas:

$$q_1 = a_{1,2} = \int_1^2 p dv$$

Por la premo validas la rilato el la stata ekvacio: $p = \frac{rT}{v}$

$$q_1 = rT_a \int_1^2 \frac{dv}{v} = rT_a \ln \frac{v_2}{v_1} = a_{1,2}$$

$a_{1,2}$ estas la alkondukita varmo. Ĝi estas pozitiva.

La forkondukita varmo dum la izoterma kunpremo (3-4) estas:

$$|q_2| = |a_{3,4}| = \left| \int_3^4 p dv \right| = \left| rT_b \int_3^4 \frac{dv}{v} \right|$$

$$|q_2| = rT_b \ln \frac{v_3}{v_4} = a_{3,4}$$

$a_{3,4}$ estas la forkondukita varmo. Ĝi estas negativa.

Se oni pruvas, ke la proporcioj de volumenoj $v_2/v_1 = v_3/v_4$, tiel proporcio de aldonita kaj forprenita varmoj egalas al la temperaturproporcio de la provizujoj T_a/T_b .

El al dependeco de stataj grandoj por la adiabata ŝanĝiĝo de la gaso validas

a) por la adiabata kunpremo:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_4}{v_1} \right)^{\kappa-1} = \frac{T_a}{T_b}$$

(87)

$$\left(\frac{T_a}{T_b} \right)^{\frac{1}{\kappa-1}} = \frac{v_4}{v_1}$$

b) por la adiabata ekspansio:

$$\frac{T_2}{T_3} = \left(\frac{v_3}{v_2} \right)^{\kappa-1} = \frac{T_a}{T_b}$$

(88)

$$\left(\frac{T_a}{T_b} \right)^{\frac{1}{\kappa-1}} = \frac{v_3}{v_2}$$

oni povas la ekvacioj (87) kaj (88) unuigi:

$$\frac{v_4}{v_1} = \frac{v_3}{v_2}$$

aŭ ankaŭ

(89)

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{v_3}{v_4}$$

Kiam estas la proporcioj de la specifaj volumenoj egalaj, tiam estas ankaŭ iliaj naturaj logaritmoj egalaj. La ekspansia kaj kunperema adiabatataj laboroj estas en siaj absolutaj valoroj egalaj, sed reciproke sinnuligantaj.

$$a_{2,3} = \int_{T_b}^{T_a} cvdT$$

$$a_{4,1} = - \int_{T_b}^{T_a} cvdT$$

$$|a_{2,3}| = |a_{4,1}|$$

$$a_{2,3} = a_{4,1}$$

Tial restas nur la laboroj el la izotermaj procezoj kaj la laboro de la tuta ciklo de Carnot estas:

$$a_0 = q_1 - q_2$$

La varmfikeco de la ciklo de Carnot estas:

(90)

$$\eta_t = 1 - \frac{T_b}{T_a}$$

La varmfikeco de la ciklo de Carnot kun la ideala gaso dependas nur de la absoluta temperaturoj, inter kiuj la ciklo realiĝas. Ĝi ne dependas de la materio uzita en la ciklo.

La ciklo de Carnot havas la plej grandan efikecon. Ĉiu alia ciklo realiĝanta inter la samaj du temperaturoj (de la izoterma ekspansio kaj de la izoterma kunpremo) devas havi la pli malgrandan varmfikecon. Tial servas la ciklo de Carnot kiel la kompara ciklo:

La ekvacio (90) rezultas:

a) La varmfikecon de la ciklo de Carnot oni povas plialtiĝi plialtiĝante la temperaturon de la varmalkonduko al la labormaterio kaj plimalatigante la temperaturon de la varmforkonduko el la labormaterio.

b) La varmfikeco ne povas atingi la valoron 1, ĉar devus esti aŭ $T_a = \infty$, aŭ $T_b = 0$. Sed bedaurinde oni ne povas ĉi tiujn ambaŭ kazojn praktike realigi.

Tio signifas, ke eĉ per la ciklo de Carnot, kies efikeco inter ĉiuj ciklo estas la plej alta, oni ne povas ĉiun alkondukitan varmon al la gaso ŝanĝi en la laboron.

La rea ciklo de Carnot

Kiam la ciklo de Carnot realiĝas en la rea direkto (tio estas kontraŭ la cirkuldirekto de horloĝmontriloj desegnite en la p-v diagramo), tiam la ciklo bezonas aldoni la laboron a_0 , egalan al la diferenco de la varmoj $q_a - |q_b|$, por ŝanĝi ĝin en la varmon, kiun oni kun la varmo q_b prenita el la pli malvarma provizujo transdonas al la pli varma provizujo.

La tutan varmon $q_a = +a_0$ oni gajnas helpe de la aldono de la laboro a_0 . La efikeco de ĉi tiu ŝanĝiĝo estas:

(91)

$$\eta'_t = \frac{q_a}{a_0} = \frac{q_a}{q_a - |q_b|} = \frac{1}{\eta_t} = \frac{T_a}{T_a - T_b}$$

q_b – la varmo prenita el la pli malvarma provizujo por 1 kg da laborgaso, kJ/kg

q_a – la varmo transdonita al la pli varma provizujo per 1 kg da laborgaso, kJ/kg

T_b – la temperaturo de la pli malvarma provizujo, °K

T_a – la temperaturo de la pli varma provizujo, °K

La efikeco de ĉi tiu varmgajnado helpe de la mekanika laboro povas atingi sufiĉe grandan valoron. Dum ĉi tiu laborciklo okazas tiel nomata “varmtraĉerpado”. La varmfikecon η'_t oni ankaŭ nomas la koeficiento de multobligado. Ĝi estas ĉiam pli granda ol 1.

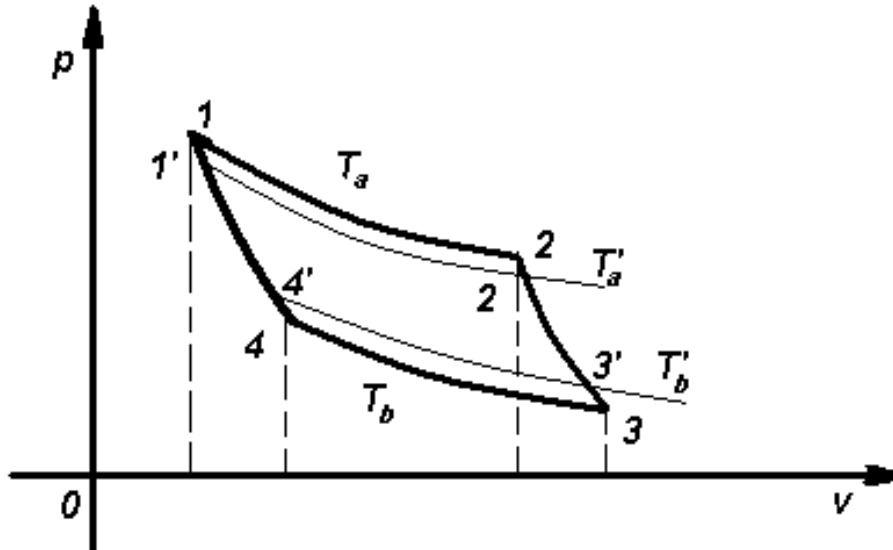
La neinversa ciklo de Carnot

La varmfikeco de la neinversa ciklo de Carnot estas pli makgranda ol la varmfikeco de inversa ciklo de Carnot. Inter la varmprovizuloj kaj la laborgaso devas esti iu temperaturdiferenco. Tial estos la temperaturo de la laborgaso dum ĝia ekspansio pli malalta kaj dum la kunpremo pli alta ol la temperaturoj de la provizuloj T_a kaj T_b .

Kiam estos la temperaturoj de ambaŭ varmprovizuloj, por kies helpo la neinversa ciklo realiĝas, T_a kaj T_b , ĉiam validas ĉi tiu rilato de la varmfikeco:

(92)

$$\eta_{neinvers} < \frac{T_a - T_b}{T_a}$$



T_a, T_b – la temperaturoj de ambaŭ varmprovizujoj, °K

T'_a, T'_b – la temperaturoj de la laborgaso, °K

q_1, q_2 – la aldonita kaj forprenita varmoj je la gaso, kJ/kg

La neinversecado de ŝanĝiĝoj estas kaŭzita pro la temperaturdiferenco inter la gaso kaj la varmprovizujo same kiel pro la frotado kaŭzas la varmeldonadon. La temperaturdiferenco inter du korpoj estas bedaŭrinde la neevitebla kondiĉo de la varminterŝanĝo. La varmo transiras de la pli varma korpo al la pli malvarma korpo. Ĉi tiu kondiĉo de la varmtransiro mem kompreneble kontraŭas la plenumon de la inversec-kondiĉo, kiu supozas termodinamikan ekvilibrecon inter la gaso kaj ĝia ĉirkaŭaĵo.

Tial validas:

(92a)

$$\eta_{neinvers} < \eta_{invers}$$

(92)

$$\eta_{neinvers} < \frac{T_a - T_b}{T_a}$$

(92b)

$$\frac{q_1 - |q_2|}{q_1} < \frac{T_a - T_b}{T_a}$$

Artikolaj fontoj kaj kontribuantoj

Termodinamiko/Leciono 3 *Fonto:* <http://eo.wikibooks.org/w/index.php?oldid=12083> *Kontribuantoj:* Aleksandro, Kajaeo

Bildaj fontoj, licencoj kaj kontribuantoj

Dosiero:Rea_ciklo.GIF *Fonto:* http://eo.wikibooks.org/w/index.php?title=Dosiero:Rea_ciklo.GIF *Permesilo:* nekonata *Kontribuantoj:* Aleksandro

Dosiero:Ciklof-de_Carnot.GIF *Fonto:* http://eo.wikibooks.org/w/index.php?title=Dosiero:Ciklof-de_Carnot.GIF *Permesilo:* nekonata *Kontribuantoj:* Aleksandro

Dosiero:Neinversa_Carnot.GIF *Fonto:* http://eo.wikibooks.org/w/index.php?title=Dosiero:Neinversa_Carnot.GIF *Permesilo:* nekonata *Kontribuantoj:* Aleksandro

Permesilo

Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported
[//creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/](http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/)