

DK 536.72/73

O prvem in drugem glavnem zakonu termodinamike

ZORAN RANT

Strojniki pišemo prvi glavni zakon takole:

$$Q = \Delta U + A \quad (1)$$

Nekemu sistemu dovedena toplota Q je enaka vsoti spremembe notranje energije tega sistema in pridobljenega dela; pri tem sta oba sumanda lahko pozitivna ali negativna. Iz enačbe (1) pa ne smemo brati več kakor dejansko izreka. Ne pove namreč ničesar o podrobnosti strukturi desne strani; ne pove ničesar o tem, od kod prihaja delo A — ali iz dovedene toplote ali pa iz spremembe notranje energije.

Tako je na primer napačno ali vsaj nenatančno reči — kar se pogosto sliši — da se sistemu dovedena toplota porablja za povečanje notranje energije in pridobivanje dela. To je v nekaterih primerih pravilno, v drugih pa prav gotovo napačno.

O tem se lahko prepričamo pri adiabatnem procesu, kjer je $Q = 0$

$$0 = \Delta U + A \text{ in iz tega } A = -\Delta U \quad (2)$$

Delo smo tu očitno pridobili iz spremembe notranje energije, ker dovedene toplote sploh ni.

Upravičeno je tedaj vprašanje, ali ne obstajajo procesi, pri katerih se tudi črpa delo le iz notranje energije sistema, čeprav se istočasno dovaja toplota od zunaj v sistem. Ali pa procesi, pri katerih en del dovedene toplote prehaja v notranjo energijo sistema, drug del pa se pretvarja v delo; pridobljeno delo pa je sestavljeno iz deleža notranje energije in deleža dovedene toplote. Tak proces je shematično narisano na sliki 1. Če obstajajo taki procesi, se vprašujemo, kolikšna sta ta deleža.

Ta vprašanja se zdijo z vidika prvega glavnega zakona precej jalova, saj je pravilen odgovor brez pomena za končni rezultat — delo je tu, pa naj si razlagamo proces kakor koli.

Vendar bomo v naslednjem videli, da je pravi odgovor zelo važen za razumevanje termodinamičnega dogajanja. Nejasnost v tem problemu

zavaja v logične težave in napačne sklepe. Odgovora pa ni mogoče dobiti iz prvega glavnega zakona; pritegniti moramo še drugi glavni zakon.

Preden se lotimo zastavljenega problema, si oglejmo zanimiv zgled. Pri izotermni ekspanziji idealnega plina od tlaka p_1 na tlak p_2 je pridobljeno delo

$$A = mRT \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (3)$$

Dovedena toplota Q pa je prav tako

$$Q = mRT \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (4)$$

Iz tega izhaja po prvem glavnem zakonu, da je

$$(\Delta U_{id})_T = 0 \quad (5)$$

in

$$(A_{id})_T = Q \quad (6)$$

Po običajni notaciji v termodinamiki pomeni indeks T , da proces poteka ob konstantni temperaturi.

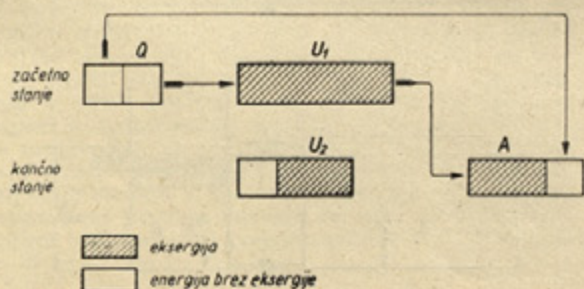
Notranja energija je ostala (na videz) nespremenjena, pridobljeno delo je (številčno) enako dovedeni toploti. Iz tega pa se skoraj vedno sklepa — prehitro in napačno — da se pri izotermni ekspanziji idealnega plina pretvarja vsa v sistem dovedena toplota v delo.

To formulacijo vsebuje veliko število učbenikov o termodinamiki, čeprav je očitno v popolnem nasprotju z drugim glavnim zakonom, iz katerega izhaja ravno nasprotno: da se toplota nikoli ne da v celoti spremeniti v delo.

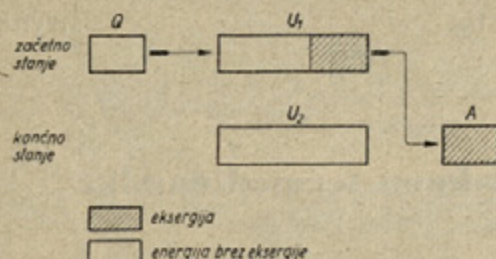
Posebno očitno postane to nasprotje, kadar plin ekspandira izotermno ob temperaturi okolice. Tudi iz tega procesa pridobivamo delo, procesu pa dovajamo toploto s temperaturo okolice. Vemo pa, da iz toplote s temperaturo okolice ne moremo pridobiti prav nobenega dela; kajti ta toplota, ki jo jemljemo iz notranje energije okolice, nima nobene eksergije (delozmožnosti). Tu pa naj bi sedaj imeli postopek, ki dokazuje ravno nasprotno, namreč da se da ta toplota, ki je eksergetično brez vrednosti, popolnoma pretvoriti v delo.

Rešitev teh nasprotstev je lažja, kakor bi mislili na prvi pogled, ker so samo navidezna in posledica premalo dognanih formulacij.

Iz enačb (3), (4) in (6) izhaja namreč samo to, da sta delo A in toplota Q po velikosti (številčno) enaka. Nikakor pa ne velja, da sta ti dve veličini tudi po bistvu, to je po kvaliteti enaki ali



Sl. 1



Sl. 2

isti. (Dve množici, vsaka po 100 oseb, sta številčno enaki, v drugih bistvenih lastnostih sta pa lahko zelo različni: n. pr. 100 moških, 100 žensk.) Prav tako izhaja iz enačbe (5) samo to, da je notranja energija ostala po velikosti nespremenjena; o konstantnosti njene kvalitete pa enačba ne izreka ničesar.

Iz drugega glavnega zakona vemo, da se lahko pridobiva delo iz energij le v toliki meri, kolikor imajo te energije neko eksergijo. Delo je mogoče pridobivati le iz eksergij [1]. Pri izotermni ekspanziji idealnega plina ob temperaturi okolice nima dovedena toplota nobene eksergije. Pač pa ima eksergijo stisnjeni plin, katerega tlak p_1 je večji od tlaka okolice p_0 [1]:

$$Ex = I_1 - I_2 - T_0 (S_1 - S_2)$$

Indeks 1 se nanaša na začetno stanje, indeks 2 pa na stanje v ravnotežju z okolico.

Zaradi idealnosti plina je $I_1 = I_2$ in

$$Ex = -T_0 (S_1 - S_2)$$

Dovedena toplota pa je tudi

$$Q = T_0 (S_2 - S_1)$$

Eksergija komprimiranega idealnega plina je po velikosti enaka toploti, ki jo dovajamo v plin iz okolice pri izotermni ekspanziji do tlaka okolice.

Iz te eksergije, ki je natanko — tako po velikosti kakor tudi po kvaliteti — enaka največjemu delu, ki se lahko dobi iz stisnjenega plina, se črpa delo; ta eksergija se pretvarja v delo. Toplota pa, ki jo dovajamo, drži notranjo energijo sistema konstantno. Ta toplota se mora dovajati v sistem iz razlogov ravnotežja z okolico.

Iz stisnjenega zraka s temperaturo okolice lahko sicer pridobivamo delo tudi tedaj, če ne dovajamo toplote iz okolice. To je delo adiabatne ekspanzije, ki je enako:

$$A_s = \frac{mRT}{k-1} \left[1 - \frac{p_2}{p_1} \right] \quad (7)$$

in je manjše kakor izotermno delo, ker sistem na koncu še ni v ravnotežju z okolico. Seveda nismo pri tem izčrpali vse eksergije.

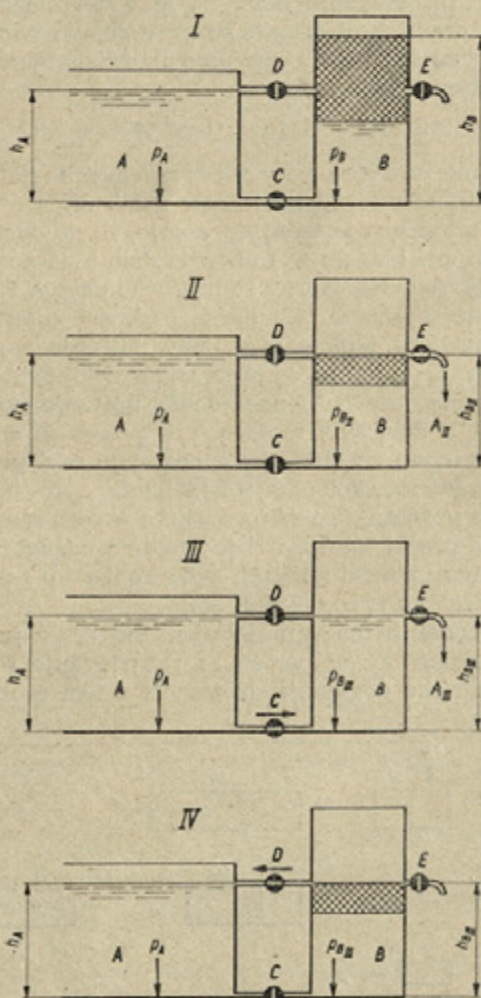
Opisano gledanje na izotermno ekspanzijo odstranja vse nejasnosti in navidezna nasprotja.

Na sliki 2 vidimo mehanizem izotermne ekspanzije idealnega plina pri temperaturi okolice do tlaka okolice. Delo A se črpa iz eksergije notranje energije. Toplota Q pa nadomešča kvantitativno (toda ne kvalitativno) iz notranje energije odvzeto eksergijo. Lahko bi rekli, da ta toplota eksergijo nekako iztiska iz notranje energije.

Vse to se da nazorno pokazati v modelu (analogiji), kakršnega vidimo na sliki 3/I. Kakor vsaka primerjava, tudi ta tako ali tako šepa, a naši problemi so z njo kar dobro zadeti.

Imamo dve posodi: leva A, katere površina je poljubno velika, predstavlja okolico; desna B z razmeroma majhno površino je slika sistema. »Okolica« je napolnjena do višine h_A z vodo, sistem pa do višine h_B v spodnjem delu z vodo, nad katero pa je kapljevina, ki je redkejša od vode (n. pr. olje). Posodi A in B sta zvezani z dvema cevka, ki se dasta zapreti s pipama C in D. Pipa D je nameščena na višini nivoja v posodi A. Na enaki višini je v posodi B še druga pipa E, skozi katero lahko odtakamo kapljevino iz te posode.

V tem modelu veljajo analogije: količina (masa) kapljevine ustreza energiji, višina nivoja



Sl. 3

nad dnem (h_A in h_B) predstavlja tlak, hidrostatski tlak na dnu posod (p_A in p_B) je analogen temperaturi. Količina kapljavine, ki jo odtočimo skozi pipo E, predstavlja delo. Maksimalna količina kapljavine, ki jo lahko odvzamemo skozi pipo E, ustreza eksergiji sistema B.

Z modelom bomo izvedli nekaj poizkusov ob »temperaturi okolice«. Če odpremo pipo C, se v obeh posodah izenači hidrostatski tlak, v obeh sistemih zavladava ista temperatura. Ker je posoda A (okolica) poljubno velika, je pri tem ostal p_A konstanten in se je le p_B prilagodil velikosti p_A .

Poizkus 1. (Slika 3/II.) Pipi C in D sta zaprti, sistem B je toplotno izoliran od okolice A. Odpremo pipo E, skozi katero izteče kapljavina do višine $h_{BII} = h_A$. Količina, ki je iztekla, predstavlja pridobljeno delo A_{II} . Dogodek je analogen izentropni (adiabatni) ekspanziji na tlak okolice. Temperatura sistema je sedaj nižja kakor temperatura okolice. Saj je $p_{BII} < p_A$ zaradi v B preostale kapljavine z manjšo gostoto.

Poizkus 2. (Slika 3/III.) Pipa D je zaprta, pipa C pa odprta. Sistem B je zvezan z okolico, zaradi česar je v B hidrostatski tlak vedno enak p_A . Po analogiji vlada v B vedno temperatura okolice. Procesi morajo potekati izotermno. Če sedaj odpremo pipo E, bo, kakor lahko spoznamo, izteklo več kapljavine kakor pri poizkusu 1. Gostejša voda iz okolice bo namreč iztisnila iz B vso kapljavino z manjšo gostoto (vse olje). Očitno smo dosegli maksimum iztoka skozi E. Delo A_{III} , ki smo ga pridobili sedaj, je eksergija sistema; ta eksergija je po analogiji enaka količini olja, ki je bila na začetku v B. Tako vidimo, da se voda iz okolice nikakor ne pretvarja v olje, pač pa pomaga izkoristiti zadnjo kapljo olja (eksergije), ki je pa od vsega začetka že obstajala v posodi B. Voda iz posode A (eksergija okolice) iztisne olje iz posode B (eksergija sistema).

Na koncu poizkusa je $h_{BIII} = h_A$ in $p_{BIII} = p_A$ ali analogno: tlak sistema je enak tlaku okolice,

temperatura sistema pa je enaka temperaturi okolice.

Poizkus 3. (Slika 3/IV.) Pipi C in E sta zaprti, pipo D odpremo. Nivo v posodi B pade na nivo v posodi A; analogija: tlak sistema B se izenači s tlakom okolice. En del olja se je prelil v posodo A, kjer sedaj plava v neskončno tanki plasti na površini. Tega dela olja ne moremo nikoli več iztočiti skozi pipo E. Eksperiment predstavlja adiabatni iztok plina ob dušitvi v okolico. Če je sistem toplotno izoliran od okolice, ima sistem na koncu manjšo temperaturo kakor okolica ($p_{BIII} < p_A$) in zato še nekaj eksergije; v posodi B je še nekaj olja, ki ga lahko odtočimo skozi pipo E, če hkrati odpremo pipo C.

Če pa bi bili odprli hkrati pipi C in D, bi se bilo vse olje prelilo skozi D v A. Skozi E potem ne bi bili mogli več odtočiti nobenega olja. Imeli bi izotermni iztok plina ob dušitvi v okolico.

Olje, ki se razlije po površini posode A, predstavlja pri opisanih procesih razvrednoteno energijo ali uničeno eksergijo.

Zaključek:

Delo v obrazcu prvega glavnega stavka

$$Q = \Delta U + A$$

se lahko črpa le iz eksergij, ki obstajajo v energijah Q ali U ali pa v obeh hkrati. Kadar je eksergija samo v eni od obeh komponent, črpamo delo samo iz te komponente. V tem primeru je mehanizem dogajanja enoznačen. Če imata eksergijo obe komponenti, ni mogoče določiti, iz katerih eksergij je delo pridobljeno. Ta določitev pa ne bi imela nobenega fizikalnega pomena.

Literatura

[1] Rant, Z.: Vrednost in obračunavanje energije (SV 1955 — 1, str. 4—7).

Avtor: prof. dr. ing. Zoran Rant, Oddelek za strojništvo Univerze v Ljubljani.

DK 621.9.002.2

Razvojne smeri v gradnji obdelovalnih strojev

JANEZ PEKLENIK

Obdelovalna tehnika kovin je zabeležila v zadnjih desetih letih zelo velik napredek. Uvedba velikih rezalnih hitrosti, novih rezalnih materialov, zahteve po zelo velikih natančnostih in kvaliteti površin pri obdelovancu ter po velikih odrezalnih storilnostih¹ so narekovele razvoj obdelovalnih strojev v tem časovnem obdobju v prav posebni meri. Z vedno obširnejšim uvajanjem avtomatizacije v obrate s serijsko in množinsko proizvodnjo se je ta razvoj kazal tudi na oblikovanju obdelovalnega stroja. Peta evropska razstava obdelovalnih strojev v Hannoveru lani jeseni je podala reprezentativni pregled razvoja te veje strojegradnje. Na kratko bomo skušali podati značilne razvojne tendence, ki se kažejo v:

¹ Odrezalna storilnost = odrezani volumen materiala v časovni enoti (n. pr. v minuti, sekundi).

1. konstruktivnem razvoju obdelovalnega stroja glede na povečanje statične in dinamične togosti, natančnosti obdelave in povečanja rezalnih hitrosti ter poenostavljenja upravljanja,

2. pozicioniranju in programskem upravljanju strojev,

3. sklopitvi stroja z merilno napravo v krmilni sistem in

4. sklopitvi strojev v obdelovalne proge.

Celotna problematika je preobširna, da bi jo mogli na tem mestu obravnavati podrobneje. Zato se bomo omejili le na najznačilnejše izvedbe, ki so v splošnem značilne za današnje stanje razvoja.