

DK 621.187.2

O zmogljivosti in moči, specifični obremenitvi ter izkoristku parnih kotlov*

BOJAN KRAUT

Parni kotli so v bistvu stare naprave. V teku razvoja so sicer močno menjali pogoje za delovanje in konstrukcijsko izvedbo, moč tradicije pa je vse do sedaj obdržala zanje v rabi nekaj označb, ki so že prav resno zastarele. Posebno velja to za nekatere označbe za zmogljivost in moč, specifično obremenitev ter izkoristek.

O ZMOGLJIVOSTI IN MOČI

Parni kotli so predvsem menjalniki toplote. Njihovo zmogljivost izraža toplotni tok z dimnih plinov skozi stene ogrevalnih površin na vodo, ki se pri tem segreva in uparja.

Toplotni tok Φ [W, kcal/h] računamo z enačbo:

$$\Phi = k \theta A, \quad (1)$$

v kateri označujejo: k — koeficient prehoda toplote [W/deg m², kcal/h deg m²], θ — razliko temperatur med dimnimi plini in vodo-paro [deg] ter A — ogrevalno površino [m²].

Pri enostavnih parnih kotlih za nasičeno paro z majhnim tlakom, kakršni so bili prvi parni kotli, ne variirata v širokem območju niti prehodnostni koeficient k niti razlika temperatur θ . Toplotni tok Φ je torej v tem primeru — v glavnem — odvisen samo od velikosti ogrevalnih površin A . Nič ni torej čudnega, če je za označbo zmogljivosti parnih kotlov služila v prejšnjih časih kar velikost ogrevalnih površin. Tudi tačas ta način označevanja zmogljivosti uporabljajo še vedno pri starejših parnih kotlih.

Prav gotovo pa enostavno označevanje zmogljivosti parnih kotlov z velikostjo ogrevalnih površin ne more več biti primerno, če se znatno spremenita prehodnostni koeficient k in temperaturna razlika θ . To velja že pri porazdelitvi ogrevalnih površin pri kotlu na osnovne dele — na grelnik za vodo, uparjalnik in pregrevalnik pare. Prehodnostni koeficient in temperaturna razlika sta različna za vsakega od teh delov in s tem je različna tudi vrednost posamezne ogrevalne površine za toplotni tok. Zato so že v preteklosti začeli uporabljati za označbo zmogljivosti parnih kotlov navedbe velikosti ogrevalnih površin posamično za vse njihove osnovne dele. Tako se še zmerom označuje zmogljivost lokomotivskih parnih kotlov.

Z razvojem konstrukcije parnih kotlov in bistveno spremembo pogojev za delovanje pa je označevanje njihove zmogljivosti z velikostjo ogrevalnih površin postalo povsem nevzdržno. Izredno izboljšanje toplotne prestopnosti z dimnih plinov na kotelske stene z ustrežnejšim oblikovanjem ogrevalnih površin in prenosom toplote z žarčenjem je za večkrat povečalo toplotni tok skozi enako površino. Vrednost ogrevalne površine se je s tem močno povečala, zato njena velikost nikakor ni več mogla služiti za primerjavo zmogljivosti parnih kotlov samih.

Razvoj je privedel do razdobja, ko se je zmogljivost parnih kotlov začela meriti z njihovim toplotnim učinkom, toda ne neposredno s toplotnim tokom, ampak s količino vode, uparjene v časovni enoti. Za mero zmogljivosti je torej začel služiti pretok mase (vode-pare) skozi parni kotel.

Toplotni tok Φ , ki prehaja na vodo-paro, določamo s pretokom mase q [kg/s, kg/h] po enačbi:

$$\Phi = q (h_1 - h_v), \quad (2)$$

v kateri označuje h specifično entalpijo [J/kg, kcal/kg], in sicer je h_1 specifična entalpija pregrete pare in h_v specifična entalpija napajalne vode.

Če se torej entalpijske razlike ($h_1 - h_v$) pri različnih kotlih bistveno ne razlikujejo, je pretok mase q — za primerjavo — zares lahko približna slika toplotnega toka in s tem zmogljivosti parnih kotlov. Pri povprečnih parnih kotlih se entalpijske razlike ne razlikujejo zelo mnogo, saj znašajo večinoma 3100 ... 3400 kJ/kg (750 ... 810 kcal/kg). Medsebojna primerjava pretokov mase torej — za približno oceno — lahko ustreza primerjavi zmogljivosti. Vsekakor so netočnosti nesorazmerno manjše kakor pa pri medsebojnem primerjanju zmogljivosti parnih kotlov z velikostmi ogrevalnih površin.

Poslej je označevanje zmogljivosti parnih kotlov z njihovim pretokom mase splošno v rabi. Žal pa to označevanje ni natančno, ker je toplotni tok razen od pretoka mase odvisen tudi še od entalpijske razlike. Vendar se zanjo strokovnjaki v praksi pri omembi zmogljivosti ne menijo mnogo, saj je zmogljivost sama zaradi široke obremenitvene elastičnosti parnih kotlov dokaj neprecizen pojem, tako da razmeroma majhne razlike v entalpiji zanjo niso zelo važne.

Kakor hitro pa entalpijske razlike postanejo važne za zmogljivost parnih kotlov, nastajajo težave pri njenem ocenjevanju s pomočjo pretoka mase. Vztrajanje pri tem načinu označevanja

* V tem članku so uporabljeni simboli, kakršni so v veljavni mednarodni in sprejeti v nove jugoslovanske standarde. Glede merskih enot so navedene povsod na prvem mestu enote absolutnega sistema mer MKSA (Giorgijevega), na drugem mestu pa tudi enote starega toplotnega sistema mer (kalorijskega).

zmogljivosti lahko vodi do povsem neutemeljenih podatkov. Za primer naj navedem strokovno statistiko O. E. C. E. (Organisation Européenne de Coopération Economique) iz leta 1955, ki daje pregled največjih parnih kotlov, kar jih je v Evropi v gradnji, in navaja med njimi kotle z zmogljivostjo (to je pretokom mase) 1000 t/h. Pri tem pa dodaja, da je to v resnici kotel za pretok mase 700 t/h, ki pa ima še dve naknadni vmesni pregrevanji pare, kar pomeni enako toplotno zmogljivost, kakršno bi imel navaden parni kotel s pretokom mase 1000 t/h (!). Vsekakor zanimiv primer, kolikšna je moč tradicije, zaradi katere se raje povsem nepravilno uporablja neustrezen, toda uveden način označevanja zmogljivosti, kakor pa bi se za to pravilno uporabljal — toplotni tok.

Vse nejasnosti in nenatančnosti glede določanja zmogljivosti parnih kotlov bi bile brž odstranjene, če bi zanje uporabljali le toplotni tok [W, kcal/h]. Nič novega ni to, saj bi bila nova samo pravilna raba znanih pojmov tudi pri parnih kotlih, kakor je to že davno v navadi pri drugih menjalnikih toplote, n. pr. pri napravah za gretje, centralnih kurjavah itd.

*

Parni kotli, zlasti veliki, služijo večinoma za pridobivanje pare za pogon parnih strojev. Pri tem je seveda zelo važno delo, ki ga dobimo iz energije v pari. Od toplote Q [J, kcal], ki jo dovedemo masi m [kg]:

$$Q = m(h_1 - h_v)$$

je sposoben za pretvorbo v mehansko delo samo del, ki ga je RANT¹ imenoval — eksergijo Ex [J, kcal]. Ta znaša:

$$Ex = m[h_1 - h_v - T_0(s_1 - s_v)],$$

kjer sta h_1 in h_v specifični entalpiji [J/kg, kcal/kg] pregrete pare in napajalne vode, T_0 je absolutna temperatura okolice [deg], s_1 in s_v pa sta specifični entropiji [J/deg kg, kcal/deg kg] pregrete pare in napajalne vode.

Po tem vzorcu lahko prav tako kakor o toplotnem toku govorimo tudi o »eksergijskem toku«. To je tok onega dela energije, ki se da spremeniti v mehansko delo. Mehansko delo, opravljeno v določenem času — ki ga določa tok — pa je v pravem pomenu besede moč P [W]:

$$P = q[h_1 - h_v - T_0(s_1 - s_v)] \quad (3)$$

Ker daje mehansko moč le ta del toplotnega toka parnega kotla, je v pogonskih postrojenjih edino zanimiv.

Pravo vrednost parnih kotlov lahko pokaže torej edinole njihova moč (t. j. eksergijski tok).

O SPECIFIČNI OBREMITVI OGREVALNIH POVRŠIN

Z izenačenjem enačb (1) in (2) za toplotni tok dobimo, da je

$$\Phi = k \vartheta A = q(h_1 - h_v)$$

iz česar izhaja razmerje

$$\frac{q}{A} = \frac{k \vartheta}{h_1 - h_v} \quad (4)$$

ki ga imenujemo »specifično obremenitev ogrevalnih površin [kg/sm²]. Ta pove, koliko vode-pare segrevamo ali uparjamo v časovni enoti na enoto površine. Iz enačbe (4) je razvidno, da je specifična obremenitev odvisna od prehodnostnega koeficienta k , temperaturne razlike ϑ in razlike entalpij $h_1 - h_v$. Odvisna je torej ne samo od veličin, ki so značilne za prehod toplote (k , ϑ), ampak tudi od entalpijske razlike. Ob enakih pogojih za prehod toplote bi imeli kotli z manjšo entalpijsko razliko veliko večjo specifično obremenitev kakor pa kotli z veliko razliko entalpije vode in pare. Jasno je torej, da specifična obremenitev lahko služi samo pri primerjanju delovanja kotlov ali njihovih sestavnih delov z enako entalpijsko razliko.

V praksi se uporablja specifična obremenitev predvsem v zvezi z uparjalnikom, pri čemer je entalpijska razlika — v glavnem — enaka uparjalni toploti r . Ta pa se s povečanjem tlaka zmanjšuje, medtem ko se zato specifična obremenitev povečuje. V skrajnem primeru — pri kritičnem tlaku, kjer postane uparjalna toplota $r = 0$, bi postala specifična obremenitev uparjalne površine neskončno velika. Primerjanje specifičnih obremenitev uparjalnikov, v katerih se voda uparja pri zelo različnih tlakih, je torej povsem nedopustno, saj ne daje prav nobene jasne slike o dejanski obremenitvi uparjalnih površin. Potemtakem ima lahko specifična obremenitev samo zelo omejeno uporabno vrednost.

*

Dejansko obremenitev ogrevalnih površin kaže gostota toplotnega toka Γ [W/m², kcal/h m²], ki znaša po enačbi (1):

$$\Gamma = \Phi/A = k \vartheta \quad (5)$$

Ta je torej enaka zmnožku prehodnostnega koeficienta in temperaturne razlike, to je dveh veličin, ki spadata izključno samo v področje toplotnega prehoda skozi steno. Gostota toplotnega toka omogoča medsebojno primerjavo dejanskih obremenitev ogrevalnih površin pri kakršnih koli vrstah parnih kotlov in s kakršnimi koli pogoji delovanja. Zaradi te splošne veljavnosti in smiselnih vrednosti bo morala postati izključna mera za obremenitev ogrevalnih površin in — podobno kakor se že uporablja drugod (n. pr. pri uparjalnih aparatih) — zamenjati povsem nezanesljivo specifično obremenitev tudi pri parnih kotlih.

¹ Z. Rant: Vrednost in obračunavanje energije (SV 1955-1, str. 4).

Z. Rant: Exergie, ein neues Wort für »technische Arbeitsfähigkeit« (Forschung, 1956 (1), str. 36).

Z. Rant: Vrednotenje energije v tehniški praksi (SV 1956-4, str. 111).

O IZKORISTKU

Izkoristek η imenujemo razmerje med energijo oziroma močjo, ki jo koristno pridobivamo v nekem stroju ali napravi, nasproti tisti, ki jo pri tem porabljamo. Izkoristek parnega kotla je torej razmerje toplotnega toka Φ , ki prehaja na vodo-paro, in v časovni enoti z gorivom dovedene energije:

$$\eta_k = \frac{\Phi}{B H_i} = \frac{q (h_1 - h_v)}{B H_i} \quad (6)$$

B je poraba goriva v časovni enoti [kg/s, kg/h], H_i pa je njegova kurilna vrednost (spodnja kalorična vrednost) [J/kg, kcal/kg]. Kolikor imamo ves toplotni tok, ki prehaja v parnem kotlu na vodo-paro, za energijo, koristno pridobljeno v časovni enoti, ne more biti nobenih pomislekov proti enačbi (6), kakršna je v splošni rabi.

V praksi pa se za primerjavo koristnosti pri delovanju parnih kotlov uporablja še vedno tudi »uparjalno število«, ki je razmerje pretoka mase q vode-pare in porabe goriva v časovni enoti ter znaša po enačbi (6):

$$\frac{q}{B} = \eta_k \cdot \frac{H_i}{h_1 - h_v} \quad (7)$$

Uparjalno število je torej — kakor specifična obremenitev — odvisno od entalpijske razlike, razen tega pa od izkoristka kotla in še od kurilne vrednosti goriva. Zato povsem nezanesljivo kaže koristnost parnih kotlov in je bilo še komaj uporabno samo pri starih parnih kotlih s približno enako entalpijsko razliko in enako vrsto goriva oziroma pri istem parnem kotlu za vzporedjanje delovanja, če se pogoji uparjanja in gorivo niso menjavali.

Dandanes pa lahko popolnoma opustimo »uparjalno število« kot zastarel pojem za oceno koristnosti parnih kotlov in ga dosledno nadomeščamo z izkoristkom.

Glede na pretvarjanje toplotne energije v mehansko delo pa pri ugotavljanju pravega izkoristka parnih kotlov ne moremo biti več zadovoljni s tem, da jemljemo kot koristno moč ves toplotni tok Φ , saj ga vendar niti ne moremo vsega pretvarjati v mehansko moč. Zares koristen je samo v delo spremenljivi del toplote. Zato je pravi izkoristek ζ parnih kotlov razmerje med »eksergijskim tokom« oziroma močjo P po enačbi (3) in vso v časovni enoti z gorivom dovedeno energijo, za katero moramo upoštevati pravo (zgornjo) kalorično vrednost goriva H_s [J/kg, kcal/kg], ki določa celotno energijo goriva, sproščeno pri zgorevanju:

$$\zeta = \frac{P}{B H_s} = \frac{q [h_1 - h_v - T_o (s_1 - s_v)]}{B H_s} \quad (8)$$

Samo pravi izkoristek ζ je dejanska slika o delovanju parnih kotlov, ker upošteva kot koristno

samo eksergijo, to je v delo pretvorljivi del toplote, ne pa vse energije, ki je v celoti sploh ne moremo izkoriščati, in jo primerja s celotno zgorevalno toploto.

Pravi izkoristek parnih kotlov bo tem boljši, čim večja bo razlika entalpij za paro in napajalno vodo ter čim manjša bo razlika njihovih entropij. To pa je odvisno predvsem od izbire temperature in tlaka pare.

Primer:

1. Parni kotel za tlak 100 ata in pregreto paro s temperaturo 500 °C napajamo z vodo, ki ima temperaturo 200 °C. Zmogljivost kotla — izražena s količino uparjene vode — naj znaša n. pr. 108 t/h.

Toplotni tok v tem parnem kotlu je:

$$\Phi = q (h_1 - h_v)$$

Tu veljajo vrednosti:

$$\begin{aligned} q &= 30 \text{ kg/s} = 108 \cdot 10^3 \text{ kg/h} \\ h_1 &= 3375 \text{ kJ/kg} = 806,2 \text{ kcal/kg} \\ h_v &= 855,4 \text{ kJ/kg} = 204,3 \text{ kcal/kg} \\ \Phi &= 30 (3375 - 855,4) \cdot 10^3 = 75,6 \text{ MW} \\ &= 108 \cdot 10^3 (806,2 - 204,3) = 65,0 \text{ Gcal/h} \end{aligned}$$

Prava moč (eksergijski tok) tega kotla pa je:

$$P = q [h_1 - h_v - T_o (s_1 - s_v)] = \Phi - q T_o (s_1 - s_v)$$

Ustrezne vrednosti so:

$$\begin{aligned} T_o &= 20^\circ \text{C} = 293^\circ \text{K} \\ s_1 &= 6,605 \text{ kJ/deg kg} = 1,578 \text{ kcal/deg kg} \\ s_v &= 2,314 \text{ kJ/deg kg} = 0,553 \text{ kcal/deg kg} \\ P &= 75,6 \cdot 10^3 - 30 \cdot 293 (6,605 - 2,314) \cdot 10^3 = 37,9 \text{ MW} \\ &= 65,0 \cdot 10^3 - 108 \cdot 10^3 \cdot 293 (1,578 - 0,553) = 32,6 \text{ Gcal/h} \end{aligned}$$

Kot gorivo uporabljamo premog s kalorično vrednostjo

$$\begin{aligned} \text{spodnjo: } H_i &= 8,79 \text{ MJ/kg} = 2100 \text{ kcal/kg} \\ \text{zgornjo: } H_s &= 10,7 \text{ MJ/kg} = 2555 \text{ kcal/kg} \\ \text{Poraba premoga naj bo: } B &= 10 \text{ kg/s} = 36 \text{ t/h.} \end{aligned}$$

V tem primeru bo znašal izkoristek parnega kotla:

$$\eta_k = \frac{\Phi}{B H_i} = \frac{75,6 \cdot 10^3}{10 \cdot 8,79 \cdot 10^3} = 0,86 = \frac{65,0 \cdot 10^3}{36 \cdot 10^3 \cdot 2100} = 0,86$$

Njegov pravi izkoristek pa bo samo:

$$\zeta = \frac{P}{B H_s} = \frac{37,9 \cdot 10^3}{10 \cdot 10,7 \cdot 10^3} = 0,35 = \frac{32,6 \cdot 10^3}{36 \cdot 10^3 \cdot 2555} = 0,35$$

2. Vzemimo parni kotel za tlak 40 ata in temperaturo pregrete pare 400 °C, ki ga napajamo z vodo temperature 20 °C. V njem uparjamo količino vode 54 t/h. Kot gorivo uporabljamo premog s kalorično vrednostjo: spodnjo $H_i = 15,74 \text{ MJ/kg} = 3760 \text{ kcal/kg}$, zgornjo $H_s = 17,58 \text{ MJ/kg} = 4200 \text{ kcal/kg}$. Poraba premoga naj znaša: $B = 12,5 \text{ t/h}$.

Enako preračunan kakor kotel v prvem primeru, bi ta kotel pokazal naslednje vrednosti:

$$\begin{aligned} \eta_k &= 0,86 \\ \zeta &= 0,30 \end{aligned}$$

Ta kotel ima torej enak izkoristek η_k kakor kotel v prvem primeru, njegov pravi izkoristek ζ pa je občutno slabši.

Avtor: prof. ing. Bojan Kraut, Oddelek za strojništvo Tehniške fakultete v Ljubljani