

DK 536.7:621.57.01

## Eksergijski diagram za difluordiklormetan $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ (R 12)

M. OPREŠNIK — L. KOGEJ

Uporabnost eksergijskega diagrama v hladilni tehniki je že prikazana [1]. Namen tega članka pa je podati osnove za konstrukcijo takšnega diagrama in jih uporabiti na primeru difluordiklormetana  $\text{CF}_2\text{Cl}_2$  (R 12).

Eksergijski diagram, ki je primeren za uporabo v hladilni tehniki, je diagram  $e, i$ , torej diagram, pri katerem nanašamo na ordinatno os eksergije  $e$ , na abscisno os pa entalpije  $i$ . Izekserge  $e = \text{konst}$  so paralelne abscisne osi, izentalpe  $i = \text{konst}$  pa ordinatni osi. Takšni diagrami že obstajajo, in sicer za amoniak  $\text{NH}_3$  [2], za propan in etan [3], difluordiklormetan (R 12) [4] in za ogljikov dioksid  $\text{CO}_2$  [5], vendar so vsi risani v enotah tehniškega sistema.

Da bi dobili potek ostalih preobrazb, izhajamo iz osnovne enačbe za eksergijo

$$e = i - i_o - T_o(s - s_o) \quad (1)$$

ozziroma v diferencialni obliki

$$de = di - T_o ds \quad (2)$$

Ob izentropi ( $s = \text{konst}$ ) je  $ds = 0$  in iz enačbe (2) izhaja

$$\left(\frac{\partial e}{\partial i}\right)_s = 1 \quad (3)$$

Izentrope so torej premice s konstantnim naklonom, pri čemer je  $\tan \alpha = 1$ .

Izentrope so med seboj ekvidistantne. Iz enačbe (2) dobimo za izeksergo ( $de = 0$ )

$$\left(\frac{\partial i}{\partial s}\right)_e = T_o \quad (4)$$

in

$$s - s_o = \frac{i - i_o}{T_o} \quad (5)$$

Da bi dobili potek izobar, differenciramo enačbo (2) pri konstantnem tlaku

$$\left(\frac{\partial e}{\partial i}\right)_p = 1 - T_o \left(\frac{\partial s}{\partial i}\right)_p \quad (6)$$

Za povračljive preobrazbe pa velja tudi, da je

$$T ds = di - v dp \quad (7)$$

Diferenciramo enačbo (7) pri konstantnem tlaku ( $dp = 0$ ) in dobimo

$$\left(\frac{\partial s}{\partial i}\right)_p = \frac{1}{T} \quad (8)$$

Enačbo (8) vstavimo v enačbo (6) in dobimo naklon izobar v diagramu  $e, i$

$$\left(\frac{\partial e}{\partial i}\right)_p = 1 - \frac{T_o}{T} = \frac{T - T_o}{T} \quad (9)$$

Naklon izobar je torej enak termodynamičnemu izkoristku Carnotovega krožnega procesa, ki bi potekal med temperaturo  $T$  in temperaturo okolice  $T_o$ . Pri temperaturah  $T > T_o$  naklon izobar raste z narasajočo temperaturo, pri temperaturah  $T < T_o$  pa je naklon izobar negativen, izobare torej padajo z leve proti desni. To velja tudi za območje kapljivine, v katerem pa izobare pri ne previsokih tlakih praktično Sovpadajo s spodnjo mejno krivuljo. Tudi prehodi izobar prek mejnih krivulj so zvezni.

Iz enačbe (9) izhaja še važna ugotovitev, da je naklon izobar ovisen samo od temperature  $T$ , kolikor je temperatura okolice  $T_o$  konstantna. To pa pomeni, da morajo imeti vse izobare na presečiščih z eno izotermo enake naklone, ki jih dolčamo z enačbo (9). Tudi ta ugotovitev velja tako za območje kapljivine kakor tudi za območje pare. S tem pa imamo podano enostavno možnost za kontrolo pri risanju diagrama.

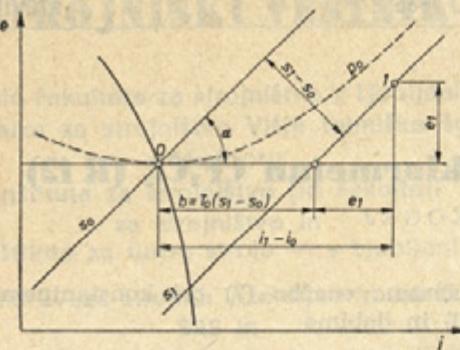
Iz enačbe (9) pa lahko ugotovimo tudi lego minimuma posamezne izobare. Za minimum velja

$$\left(\frac{\partial e}{\partial i}\right)_p = 0 = \frac{T - T_o}{T} \quad (10)$$

Iz enačbe takoj izhaja, da je minimum izobar pri temperaturi okolice

$$T = T_o \quad (11)$$

Minimum izobare je torej vedno v njenem presečišču z izotermo okolice. To pomeni, da je najmanjša vrednost eksergije pri vsakem tlaku takrat, če ima snov temperaturo okolice. Za vse tlake, ki so večji od tlaka nasičnosti pri temperaturi okolice, torej  $p > p_{so}$ , nastaja minimum v območju kapljivine, pri tlakih pa, ki so manjši od tlaka nasičnosti pri temperaturi okolice, torej  $p < p_{so}$ , nastaja minimum v območju pregrate pare.



Slika 1

Za izotermu dobimo iz enačbe (2)

$$\left(\frac{\partial e}{\partial i}\right)_T = 1 - T_o \left(\frac{\partial s}{\partial i}\right)_T \quad (12)$$

V območju mokre pare je

$$\left(\frac{\partial s}{\partial i}\right)_T = \frac{i'' - i'}{i'' - i} = \frac{1}{T} \quad (13)$$

To vstavimo v enačbo (12) in dobimo

$$\left(\frac{\partial e}{\partial i}\right)_T = 1 - \frac{T_o}{T} - \frac{T - T_o}{T} = \left(\frac{\partial e}{\partial i}\right)_p \quad (14)$$

kar je razumljivo, saj vemo, da v tem območju izoterme sovpadajo z izobarami, torej morata biti enaka tudi naklona izoterm in izobar.

Pri zelo nizkih tlakih se plin v pregretem območju obnaša podobno kakor idealni plin. Pri idealnem plinu pa je entalpija čista funkcija temperature. Pri izotermi je torej entalpija konstantna, torej  $de = 0$  in

$$\left(\frac{\partial s}{\partial i}\right)_T = \infty$$

Zato izhaja iz enačbe (12) za  $p = 0$

$$\left(\frac{\partial e}{\partial i}\right)_T = -\infty \quad (15)$$

Izoterme se torej v pregretem področju približujejo pri nizkih tlakih v diagramu  $e, i$  navpični asimptoti. Maksimum izoterme dobimo iz enačbe (12)

$$\left(\frac{\partial e}{\partial i}\right)_T = 0 = 1 - T_o \left(\frac{\partial s}{\partial i}\right)_T$$

in

$$\left(\frac{\partial i}{\partial s}\right)_T = T_o \quad (16)$$

Maksimum nastaja torej na mestu, kjer je v diagramu  $i, s$  tangens naklonskega kota izoterm enak temperaturi okolice. Če imamo za snov diagram  $i, s$ , lahko takoj ugotovimo, kje nastaja maksimum eksnergijskega izoterm.

Ker se stanje okolice spreminja [6], moramo določiti še lego premice okolice pri spremenjenih pogojih. Premica okolice je tangenta na izobaro okolice v presečišču izoterme okolice s to izobaro. Tangenta na izobaro je po enačbi (9) enaka termodynamičnemu izkoristku Carnotovega krožnega procesa. Po enačbi (14) pa je to tudi naklon izoterme v območju mokre pare. Zato je premica okolice vedno paralelna izotermi v območju mokre pare.

Prednost tega diagrama je tudi ta, da lahko pri kvalitativnih bilancah enostavno razbiramo tudi anergije (slika 1).

S tem smo podali osnovne zakonitosti, ki veljajo za diagram  $e, i$  in s katerimi lahko kontroliramo potek posameznih preobrazb. Določiti moramo še potrebne vrednosti posameznih veličin stanja. Če vstavimo v enačbo (2) za entalpijo izraz

$$di = c_p(T, p) dT + \left[ v - T \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right] dp$$

in za entropijo izraz

$$ds = \frac{c_p(T, p)}{T} dT - \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p dp$$

dobimo izraz za eksnergijo

$$de = \left( 1 - \frac{T_o}{T} \right) c_p(T, p) dT + \left[ v - (T - T_o) \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right] dp \quad (17)$$

Do istega rezultata pridemo seveda tudi, če izrazimo eksnergijo kot funkcijo tlaka in temperature

$$e = e(p, T)$$

Potem je

$$de = \left( \frac{\partial e}{\partial T} \right)_p dT + \left( \frac{\partial e}{\partial p} \right)_T dp \quad (18)$$

Diferenciramo enačbo (2) pri konstantnem tlaku po temperaturi

$$\left( \frac{\partial e}{\partial T} \right)_p = \left( \frac{\partial i}{\partial T} \right)_p - T_o \left( \frac{\partial s}{\partial T} \right)_p$$

Ker je

$$\left( \frac{\partial i}{\partial T} \right)_p = c_p(T, p) \quad \text{in} \quad \left( \frac{\partial s}{\partial T} \right)_p = \frac{c_p(T, p)}{T}$$

je diferencialni kvocient

$$\left( \frac{\partial e}{\partial T} \right)_p = \left( 1 - \frac{T_o}{T} \right) c_p(T, p) \quad (19)$$

Ce diferenciramo enačbo (2) še po tlaku pri konstantni temperaturi

$$\left( \frac{\partial e}{\partial p} \right)_T = \left( \frac{\partial i}{\partial p} \right)_T - T_o \left( \frac{\partial s}{\partial p} \right)_T$$

dobimo z upoštevanjem, da je

$$\left(\frac{\partial i}{\partial p}\right)_T = v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p \quad \text{in} \quad \left(\frac{\partial s}{\partial p}\right)_T = - \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p$$

diferencialni kvocient

$$\left(\frac{\partial e}{\partial p}\right)_T = v - (T - T_0) \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p \quad (20)$$

Vstavimo enačbi (19) in (20) v enačbo (18) in dobimo enačbo (17). Z integracijo te enačbe dobimo eksergijo, kolikor poznamo termično enačbo stanja in podatke o specifični toploti, snovi. Oba diferencialna kvocienta (enačbi 19 in 20) bi dobili seveda takoj tudi s primerjavo enačb (17) in (18). Odvod eksergije po temperaturi pri konstantnem tlaku (enačba 19) pomeni tisti del specifične toplotne, ki ga lahko pretvorimo v delo, torej eksergijo specifične toplotne. Drugi diferencialni kvocient, torej odvod eksergije po tlaku pri konstantni temperaturi (enačba 20) pa pomeni volumen. Če vsta-

vimo v to enačbo vrednosti za idealni plin, se izkaže, da je to volumen idealnega plina pri temperaturi okolice in vsakokratnem tlaku.

Vse vrednosti o lastnostih R 12 so povzete oziroma izračunane po podatkih H. D. Baehra in E. Hickena [7]. Stanje okolice je izbrano pri temperaturi 20 °C in tlaku 1 bar. Entropije v diagramu so absolutne entropije. Pri navedenem stanju okolice sta izračunani konstanti  $i_0 = 303,764 \text{ kJ/kg}$  ter  $s_0 = 2,4734 \text{ kJ/kg K}$ , ki ju potrebujemo, da bi lahko po enačbi (1) določali eksergije.

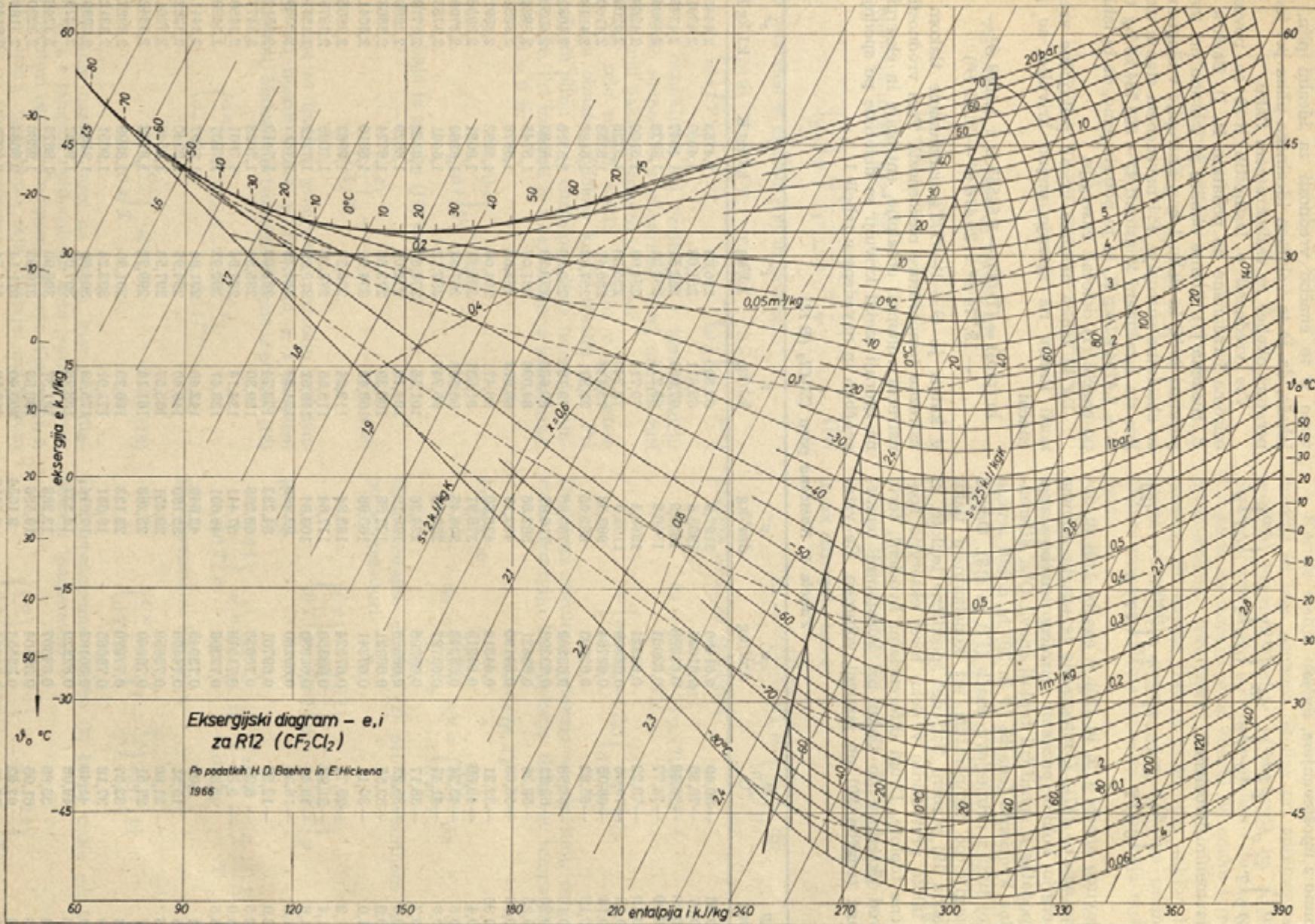
Da bi lahko natanko vrisali priključne vrednosti tlakov na zgornjo mejno krivuljo, so po enačbi

$$\ln(p/p_k) = (T_k/T)(-6,64555 \Theta + 3,4589 \Theta^2 - 13,774 \Theta^3 + 25,476 \Theta^4 - 21,92 \Theta^5)$$

v kateri je  $\Theta = 1 - T/T_k$ , izračunane tlakom p ustrezne temperature nasičenosti. Tem vrednostim ustrezni volumeni, entalpije, entropije in eksergije na zgornji mejni krivulji so določene po spodnjih enačbah in navedene v tabeli 1.

Tabela 1: Nasičena para  $\text{CF}_2\text{Cl}_2$  (R 12)

$p$ bar	$\vartheta$ °C	$v'$ $\text{dm}^3/\text{kg}$	$v''$ $\text{dm}^3/\text{kg}$	$t'$ $\text{kJ/kg}$	$i''$ $\text{kJ/kg}$	$s'$ $\text{kJ/kg K}$	$s''$ $\text{kJ/kg K}$
0,06	-80,49	0,61480	2197,9	63,895	250,64	1,4753	2,4445
0,07	-78,36	0,61694	1903,6	65,911	251,63	1,4857	2,4391
0,08	-76,48	0,61886	1680,9	67,684	252,51	1,4947	2,4345
0,09	-74,77	0,62061	1506,2	69,273	253,31	1,5028	2,4304
0,10	-73,22	0,62221	1365,5	70,711	254,03	1,5100	2,4269
0,12	-70,46	0,62509	1152,5	73,248	255,33	1,5226	2,4209
0,14	-68,05	0,62764	998,58	75,438	256,47	1,5333	2,4160
0,16	-65,92	0,62993	882,05	77,371	257,48	1,5427	2,4118
0,18	-63,98	0,63202	790,66	79,105	258,39	1,5510	2,4082
0,20	-62,22	0,63393	716,97	80,680	259,23	1,5585	2,4050
0,25	-58,36	0,63821	582,86	84,096	261,07	1,5745	2,3934
0,30	-55,08	0,64190	492,17	86,973	262,63	1,5878	2,3933
0,35	-52,21	0,64519	426,60	89,471	264,00	1,5992	2,3891
0,4	-49,66	0,64815	376,91	91,687	265,21	1,6091	2,3856
0,5	-45,24	0,65340	306,45	95,508	267,33	1,6260	2,3799
0,6	-41,47	0,65797	258,76	98,747	269,12	1,6401	2,3755
0,7	-38,17	0,66206	224,26	101,58	270,69	1,6522	2,3719
0,8	-35,22	0,66578	198,10	104,10	272,09	1,6629	2,3689
0,9	-32,55	0,66921	177,56	106,39	273,36	1,6724	2,3663
1,0	-30,11	0,67241	160,98	108,49	274,51	1,6810	2,3641
1,2	-25,75	0,67824	135,34	112,24	276,57	1,6963	2,3605
1,4	-21,92	0,68350	117,64	115,55	278,36	1,7095	2,3575
1,6	-18,49	0,68880	103,84	118,52	279,95	1,7212	2,3551
1,8	-15,38	0,69280	92,989	121,24	281,39	1,7317	2,3530
2,0	-12,53	0,69701	84,233	123,74	282,69	1,7413	2,3512
2,5	-6,26	0,70658	68,266	129,30	285,54	1,7623	2,3477
3,0	-0,88	0,71518	57,441	134,14	287,94	1,7801	2,3450
3,5	3,85	0,72308	49,601	138,47	290,02	1,7957	2,3428
4	8,09	0,73045	43,649	142,40	291,84	1,8097	2,3411
5	15,51	0,74405	35,190	149,40	294,95	1,8340	2,3382
6	21,88	0,75659	29,451	155,57	297,53	1,8549	2,3361
7	27,51	0,76840	25,288	161,14	299,72	1,8733	2,3342
8	32,57	0,77970	22,123	166,25	301,60	1,8899	2,3327
9	37,18	0,79065	19,631	171,01	303,24	1,9051	2,3312
10	41,43	0,80133	17,614	175,49	304,69	1,9192	2,3299
12	49,08	0,82229	14,537	183,76	307,07	1,9447	2,3273
14	55,86	0,84307	12,288	191,37	308,90	1,9675	2,3248
16	61,95	0,86404	10,556	196,53	310,25	1,9886	2,3220
18	67,52	0,88553	9,1654	205,40	311,14	2,0084	2,3188
20	72,65	0,90784	8,0036	212,16	311,54	2,0275	2,3149



Za območje pregrate pare so za vrisane tlake in vrisane temperature volumni izračunani po enačbi

$$\frac{v}{\text{dm}^3/\text{kg}} = 0,343782 \frac{(T/\text{K})}{(\text{p}/\text{bar})} \left[ 1 + \sqrt{1 + 2030,7 \frac{(\text{p}/\text{bar})}{(T/\text{K})^2} \left( 1 - \frac{1241,7}{(T/\text{K})} \right)} \right]$$

entalpije po enačbi

$$\frac{i}{\text{kJ/kg}} = 189,20 + 0,141294 (T/\text{K}) + \\ + 1,04335 \cdot 10^{-3} (T/\text{K})^2 - 6,04099 \cdot 10^{-7} (T/\text{K})^3 + \\ + \left( \frac{\text{dm}^3/\text{kg}}{v} \right) \left( 48,0 - \frac{89,4 \cdot 10^3}{(T/\text{K})} \right)$$

ter entropije po enačbi

$$\frac{s}{\text{kJ/kg K}} = 1,1658 + 2,0867 \cdot 10^{-3} (T/\text{K}) - \\ - 9,06149 \cdot 10^{-7} (T/\text{K})^2 + 0,0725379 \ln(T/\text{K}) + \\ + 0,0687563 \ln \left( \frac{v}{\text{dm}^3/\text{kg}} \right) - \left( \frac{\text{dm}^3/\text{kg}}{v} \right) \frac{29,8 \cdot 10^3}{(T/\text{K})^2}$$

Eksergije so izračunane po enačbi (1). Po zgornjih enačbah sta določeni tudi že prej omenjeni entalpijska in entropijska konstanta.

Vrednosti za izohore v pregretu območju so izračunane iz enačbe za eksergijo pri različnih temperaturah, v območju mokre pare pa določimo za cele vrednosti volumnov pri raznih temperaturah suhost pare  $x$  in za natančnejše nanašanje še entalpijo  $i = i' + x r$ .

Z vsemi temi vrednostmi je narisani diagram  $e, i$  za R 12 (str. 108). V diagram je vrisano tudi robno merilo za določitev premice okolice pri spremenjeni temperaturi okolice. Včasih pa takšen diagram razdelimo in rišemo potem območje pregrate pare z večjim merilom za entalpije, območje mokre pare pa z manjšim merilom za entalpije in večjim merilom za eksergije. S tem se povečuje natančnost ustreznih razbirkov v odvisnosti od namena.

### Literatura

[1] M. Oprešnik: Uporabnost eksergijskega diagrama v hladilni tehniki. Stroj. V., XII (1966), št. 3, 57–62.

[2] V. M. Brodanskij, I. P. Iškin: Primenenie diagrammy entalpija — eksergija dlja termodinamičeskikh rasčetov. Holodil'naja tehnika, 1962 (1), 19–24.

[3] V. I. Kostjuk: Diagrammy  $i, ex$  dlja propana i etana. Holodil'naja tehnika, 1963 (2), 77–78.

[4] H. Glaser: Die thermodynamische Untersuchung von Kälteprozessen mit Hilfe der technischen Arbeitsfähigkeit. Kältetechnik, 1963 (11), 344–353.

[5] H. Glaser: Einige thermodynamische Beziehungen für die technische Arbeitsfähigkeit und ein Exergiediagramm für Kohlendioxyd. Kältetechnik, 1964 (11), 345–348.

[6] W. Fratzscher, G. Gruhn: Die Bedeutung und Bestimmung des Umgebungszustands für exergetische Untersuchungen. Brennst.-Wärme-Kraft, 1965 (7), 337–341.

[7] H. D. Baehr, E. Hicken: Die thermodynamischen Eigenschaften von  $\text{CF}_2\text{Cl}_2$  (R 12) im kältetechnisch wichtigen Zustandsbereich. Kältetechnik, 1965 (5), 143–150.

Naslov avtorjev: doc. Miran Oprešnik, dipl. ing. in Leopold Kogej, dipl. ing. Fakulteta za strojništvo v Ljubljani

DK 621.979.004.1

## Karakteristike in dinamični izkoristek vretenskih preš pri plastičnem preoblikovanju

FRANC GOLOGRANC

V tehniki preoblikovanja so zelo pogosto v rabi vretenske preše, ki se po načinu delovanja bistveno razlikujejo od drugih mehaničnih preš. Glede na to, da se vztrajnik pri teh prešah ob koncu delovnega giba ustavi, se vsa njegova energija v delcu sekunde pretvori v deformacijsko delo. Po tem vidiku je torej vretenska preša podobna strojnemu kladivu. Ker pa se opira matica vijačnega vretena — razen pri preši tipa VINCENT — v zgornjo prečko, je stojalo — podobno kakor pri drugih prešah — obremenjeno na nateg. Obremenitev oziroma sila na pehalu je tem večja, čim krajsa je pot, na kateri se sprosti celotna energija gibajočih se mas. Zato je pri vsakem preoblikovalnem postopku pritisk pehala funkcija razpoložljive energije in delovnega giba, na katerem se opravi plastična deformacija. Ker pa so razmere med preoblikovanjem na videz zelo nejasne in nepregledne, lahko vretensko prešo kaj hitro preobremenimo, čeprav nismo povsem izkoristili razpoložljive kinetične energije vztrajnika. Na to je treba pri uporabi preše posebej paziti, če naj bo pravilno in gospodarno izkoriščena.

### Konstrukcijske značilnosti vretenskih preš

Poglavitna konstrukcijska posebnost vretenskih preš je vijačni pogon, pri katerem rabi za spremjanje vrtilnega gibanja v semintjakajšnje premočrtno gibanje pehala navojo vreteno, ki se izmenoma vrti v eno in drugo smer. Na vretenu je trdno nasajen vztrajnik, ki ima pri najbolj razširjenih izvedbah torni pogon z dvema ali tremi gonilnimi kolutimi. Navojo vreteno je največkrat tristopenjsko in uležajeno v prečki stojala ali pa se aksialno pomika. V prvem primeru se mora aksialno pomikati matica s pehalom (preša Vincent, vretenska udarna preša), v drugem pa je matica pritrjena v stojalu in se vzdolžno premika vreteno z vztrajnikom in pehalom. Vztrajnik, ki mora za vsak delovni gib dvakrat spremeniti smer vrtenja, ima lahko namesto tornega zobniški, hidravlični ali direkten električni pogon.

Klasičen tip vretenske tornne preše z dvema gonilnima kolutoma — toda v sodobni izvedbi — prikazujeta slike 1 in 2. Tu sta torna koluta, ki imata stalno vrtilno hitrost, aksialno pomicna, tako da ob dotiku z vztrajnikom zavrtita navojo vreteno zdaj