

# ŽELEZARSKI ZBORNIK

## VSEBINA

	Stran
Jelerčič R., M. Dobovišek, Železarna Ravne	
UPORABA ARGONA ZA PREPIHOVANJE JEKLENE TALINE	161
Bratina Janez, Železarna Ravne	
ELEKTROENERGETSKI TER OBRATOVALNI ODNOSI OBLOČNE PEČI ZA PROIZVODNJO JEKLA	173
Dobovišek B., M. Smajič, A. Rosina Metalurški inštitut	
VPLIV NEKATERIH FAKTORJEV LASTNOSTI SNOVI NA TERMOGRAME, DOBLJENE PRI DIFERENČNI TERMICNI ANALIZI	199
Vodopivec Franc, Metalurški inštitut	
TERMOMEHANIČNA PREDELAVA JEKLA	207
Rode Boštjan, Železarna Ravne	
STATISTIČNA ANALIZA REGRESIJE Z UPORABO ELEKTRONSKIH RACUNALNIKOV	221
Hodnik Janez, Metalurški inštitut	
DOLOČEVANJE SILICIJEVE KISLINE Z ŽELATINO V PROTI OGNJU ODPORNI KERAMIKI IN GLINAH	237

1969 · LETO III **3**

IZDAJAJO ŽELEZARNE JESENICE, RAVNE, ŠTORE IN METALURŠKI INŠTITUT



Jelerčič Rado, dipl. inž.  
 Dobovišek Milan, dipl. inž.  
 Železarna Ravne

ASM/SLA: D9s.Ar  
 DK: 669.046.517

## Uporaba argona za prepihanje jeklene taline

*Članek obravnava uporabo argona za prepihanje jeklene taline v ponovci. Navaja teoretične osnove in praktične izkušnje, metode in rezultate vpihovanja argona skozi talino ter stroške v N din/tono.*

### UVOD

Prvi koraki o uporabi argona za prepihanje so razmeroma stari in segajo v obdobje ob drugi svetovni vojni ter so imeli namen povečati proizvodnjo, ako bi se efekt kontakta jekla z žlindro povečal.

Uporabljali so argon pri pihanju v pečeh in deloma tudi v ponovcah. Vsi ti poizkusi so bili neuspešni predvsem zaradi

- Velike količine nečistoč v argonu, ki je vseboval preveč kisika in metana,
- zaradi neosvojenega načina pihanja v talino ter zaradi majhne količine plina.

Lotili so se poizkusov predvsem na tistem področju, kjer se zahtevajo velike količine plina, tega pa so s takratnimi napravami pridobivali še zelo malo. Pihanje v talino jim je nasploh povzročalo nemalo težav, imeli so prevelik ali premajhen pritisk, pihali so s kopjem; v peči se gibanje taline na ta način ni dalo usmeriti; kopja so hitro odgorevala in se kvarila.

Ponovni intenzivni poizkusi z uporabo argona so sledili okoli leta 1960 in do danes zavzeli tako velik obseg in izpopolnitev, da se je argon po količini uporabe uvrstil na tretje mesto med tehničnimi plini, ki se uporabljajo v železarnah, v mnogih jeklarnah pa celo na drugo mesto.

Danes se argon uporablja za prepihanje tekočega jekla v ponovcah, za zaščitno atmosfero v valjarniških pečeh, za vakuumiranje jekla, za varjenje, za transport zrnatih materialov itd. Zelo

velika količina argona se uporablja tudi pri vakuumiranju, kjer služi kot sredstvo za premešavanje taline. Komorni princip vakuumiranja se je le po zaslugi uporabe argona razširil tudi na težje šarže nad 15 ton. Tako so stare vakuumske komore povečali, dvignili in vanje vlagajo danes znatno večje ponovce ter njihovo talino uspešno vakuumirajo predvsem po zaslugi dobro premešanih šarž z argonom. Najnovejša je metoda, ki uporablja argon za vpihavanje zrnatih dodatkov v peč, zaradi hitrejšega odžveplanja in odfosforanja. Argon služi tu kot transportni medij in zaščita pred oksidacijo in navlaženjem zrnatih dodatkov. V zahodni Evropi že obratuje nekaj takih naprav zelo uspešno.

### OSNOVNI POJMI O ARGONU

Argon je plemeniti plin ter je bil prvi odkrit med plemenitimi plini. Odkril ga je Lord RAYLEIGH leta 1894 ob sodelovanju še nekaterih kemikov, imenovali so ga »ERGON«, kar pomeni neaktiven. Argon je enoatomski plin brez vonja in barve, se ne veže v nobene spojine in še celo toplo- to slabo prevaja. Podatki so:

Ar — argon . . . . .	atom. teža . . . . .	39,944
	gostota pri 760 Torr . . . . .	1,380
	temperatura topljenja . . . . .	— 189,37 °C
	specifična toplota pri 15 °C in	
	760 Torr je . . . . .	0,125 cal/gram
	kritična temperatura . . . . .	— 117,6 °C
	kritični tlak . . . . .	— 52,3 at
	temperatura vretja . . . . .	— 185,88 °C
Visoko čisti argon ima naslednjo sestavo:		
Ar . . . . .	99,9995 %	
O <sub>2</sub> . . . . .	0,0001 %	
N <sub>2</sub> . . . . .	0,0003 do 0,0005 %	
CH <sub>4</sub> . . . . .	0,0001	

Vsota vseh nečistoč v argonu ne sme presegati 0,0005 do 0,0006 %. Pri tehničnem argonu so količine nečistoč znatno večje. Analiza tehničnega argona, ki ga izdeluje tovarna Dugi Rat v Dalmaciji, ima naslednjo količino nečistoč:

O<sub>2</sub> . . . . . 0,01 do 0,001 %  
N<sub>2</sub> . . . . . 0,01 do 0,001 %  
CH<sub>4</sub> . . . . . 0,0001 %.

Čeprav argon ni zadovoljivo čist, smo dosegli ugodne rezultate. V tujini pri proizvodnji argona pazijo predvsem na kisik, da ne prekorači vrednosti 0,001 %.

### KAJ ŽELIMO DOSEČI S PREPIHOVANJEM TALINE

1. Izenačenje temperature tekočega jekla po vseh presekih ponovce.
2. Nižje začetne temperature litja in manjši padec temperature v času litja.
3. Delno znižanje vodika, kisika in dušika.
4. Enakomerno razporeditev vključkov.
5. Zmanjšanje izcej v težkih kovaških ingotih (velik presek).
6. Izboljšanje mehanskih lastnosti jekla.

Vse te zahteve dobimo z razmeroma enostavnim postopkom prepihanja taline z argonom, ki ga moramo voditi pedantno, sicer bo rezultat slab. Predno preidemo na sam postopek, si moramo ogledati odnose med plini v jeklu in vpihanim argonom.

### ARGON IN PLINI V TEKOČEM JEKLU

Plini v jeklu vsi brez izjeme škodljivo vplivajo na kvaliteto jekla, saj znižujejo fizikalne in mehanske lastnosti jekel. Jeklarji posvečajo največ pozornosti odstranitvi vodika in kisika. Vodik pride v jeklo na celi poti pridobivanja od trenutka začetnega topljenja pa do odlitega ingota ter v nadaljnji predelavi v vročem stanju. Vodik spremlja jeklo na celi poti, od dotika z zrakom, ki je vedno vlažen, od vlažnih dodatkov, vlažnega odlivnega materiala (žleb, ponovca, lijak itd.). Vodik kot glavni plinski škodljivec povzroča nastanek kosmičev in medkristalne razpoke v jeklu, posebno se to odrazi v večjih ingotih za kovačnice, ki imajo velik presek. Zaradi višjega vodika se morajo odkovki dolgočasno žariti, kar podraži proizvodnjo in vedno ne zagotovi primerne učinka. Kisik je osnova za nastanek oksidnih vključkov in jih je več v jeklu, ako je koncentracija kisika večja. Dušik pospešuje staranje jekla in medkristalne razpoke. Vsi ti pojavi so škodljivi in za sedanje zahteve kvalitete jekla velika ovira, zato se je v novejšem času začelo intenzivno delati pri odstranjevanju plinov. Pojavilo se je več postopkov. Eden od najuspešnejših je brez dvoma vakuumiranje jeklene taline, vendar je naprava draga, zavzema določen prostor

v livni jami in temperaturno močno obremenjuje peči. Zato se je iskal način, ki bi deloma nadomestil drago vakuumsko napravo. Rezultat ni izostal, dobili smo postopek prepihanja jekla z argonom. Poudariti moram, da je zmotno mišljenje, da je argon nadomestilo vakuuma. Prepihanje z argonom **ne more nadomestiti vakuumske naprave**. Ravno tako si moramo biti na jasnem, da nam prepihanje jekla ne popravi, ako je slabo izdelano v peči, zato ne pričakujemo od argona rešitev za vse napake, ki se pri proizvodnji dogajajo. Zadovoljiti se moramo **z dobrim vlivanjem, z izboljšanimi mehanskimi lastnostmi in manjšim izmečkom**.

**Vodik — H<sub>2</sub>** je, kot že povedano, glavni škodljivec za jekla, odlita v večje formate ingotov za kovačnice, ker povzroča kosmiče in medkristalne razpoke. Rezultati preprihvanih talin z argonom so pokazali, da je možno znižati vodik za določeno količino. Ako je količina vodika v jeklu večja, je tudi padec večji, pri nizkih koncentracijah pa je absolutni padec manjši. Pogoj za večje znižanje vodika je vsekakor velika količina vpihanega argona, katerega se mora vpihati nad 0,3 Nm<sup>3</sup> na tono taline. Ker je pihanje časovno omejeno, se skozi en porozni kamen ne more vpihati taka količina, moramo vgraditi v ponovco več poroznih kamnov, najbolj primerni so trije porozni kamni. Z veliko količino 2,9 Nm<sup>3</sup> argona so dosegli znižanje vodika tudi 40 %. Dejstvo je, da se pri majhnih ponovcah težko montirajo trije porozni kamni, zato večina jeklarn prepihuje z enim ali dvema kamnoma. Poleg tega je pri uporabi treh kamnov tudi padec temperature večji in regulacija težavnejša.

Literatura navaja naslednje rezultate, ki so bili doseženi pri ugodnih pogojih:

pri 1,0 Nm<sup>3</sup> Ar/tono so zabeleženi naslednji padci:

- od 9,0 utež. ppm na 6,7 utež. ppm ali za 25 %
- od 8,0 utež. ppm na 6,6 utež. ppm ali za 18 %
- od 7,0 utež. ppm na 6,3 utež. ppm ali za 9 %
- od 6,5 utež. ppm na 6,0 utež. ppm ali za 7 %

pri 2,9 Nm<sup>3</sup> Ar/tono so zabeleženi naslednji padci:

- od 9,0 utež. ppm na 5,5 utež. ppm ali za 39 %
- od 8,0 utež. ppm na 5,2 utež. ppm ali za 35 %
- od 7,0 utež. ppm na 5,4 utež. ppm ali za 23 %
- od 6,5 utež. ppm na 5,5 utež. ppm ali za 15 %

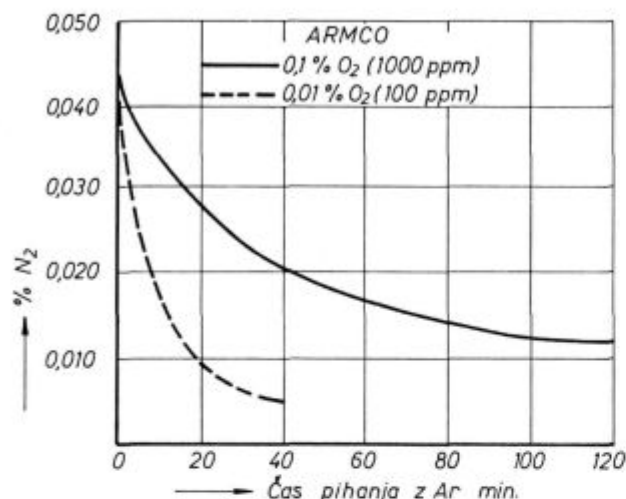
Ker se večina talin v ponovcah prepihuje z majhnimi količinami med 0,2—1,0 Nm<sup>3</sup> Ar na tono, je razvidno, da padec vodika ni bistven, le pri visokih vrednostih je ugoden.

**Kisik — O<sub>2</sub>** je ozko povezan z nastankom oksidnih vključkov, zato stremimo za tem, da bi bila koncentracija kisika čim manjša.

Za jekla, kjer se zahteva nizko število vključkov, kot npr. OCR 4 eks. sp. za kroglične ležaje, za občutljive strojne dele itd., moramo izdelati jekla, ki imajo majhno število oksidnih vključkov.

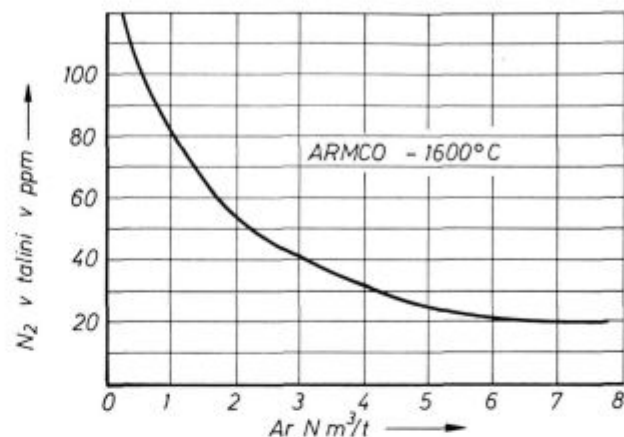
Prepihovanje jeklene taline z argonom nam da za kisik slabše rezultate kot pri vodik (območje 1,0 Nm<sup>3</sup>). Dokazano pa je, da se le zniža koncentracija kisika v jeklu in da obstaja razlika med prepihanimi in neprepihanimi šaržami. Od kisika je odvisen tudi padec dušika N<sub>2</sub>, kajti pri znižanju kisika na 100 utežnih ppm, se pojavi močan padec

nje kisika zabeleženo celo pri šaržah, ki se niso prepihale. Slika 3 prikazuje, da se dušik močno zniža s povečanimi količinami vpihavanega argona, toda že prvi pogled na diagram nam pove, da so to tako velike količine, ki jih na ta način ne moremo stlačiti v ponovco. Če uspemo prepihati 2 Nm<sup>3</sup> na tono, pa že dobimo znižanje dušika v talini na 50 ppm.

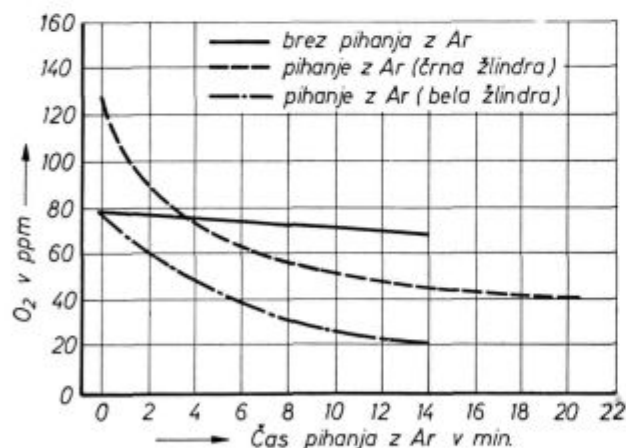


Slika 1  
Znižanje dušika v času pihanja z Ar

dušika. Na sliki 1 je to razvidno. Pri koncentraciji kisika 0,01 % že po 10 minutah pihanja dosežemo 0,017 % dušika, kar je že ugoden rezultat. Seveda se z daljšim časom pihanja dosežejo boljši rezultati, podobno kot pri vodik. Očitne so tudi razlike med načinom izdelanih šarž, tako je padec kisika



Slika 3  
Odvisnost znižanja dušika od količine Ar



Slika 2  
Znižanje dušika v času pihanja z Ar

precej večji pri šaržah, ki so izdelane z belo žilindro (slika 2) kot pa pri šaržah, izdelanih na črno žilindro. Zanimivo pri tem je, da je majhno zniža-

### PADEC TEMPERATURE JEKLA

Pri začetnih poizkusih smo bili zelo pozorni na temperaturne padce, ker se je predvidevalo, da bo padec velik. Praktični poizkusi so potrdili teoretični izračun, da pri tako veliki količini toplote, ki jo vsebuje ena šarža v ponovci, ni nevarnosti zamrzovanja, čeprav se mora pri izpuščanju šarž padec upoštevati.

Karel Feindl<sup>1)</sup> ugotavlja padec temperature na poizkusni ponovci teže 1 tone, kjer je vzdrževal temperaturo 1600 °C. Postavil je formulo za izračun padca temperature, ki se glasi:

$$T = \frac{Q_a}{G_s \cdot C_s}$$

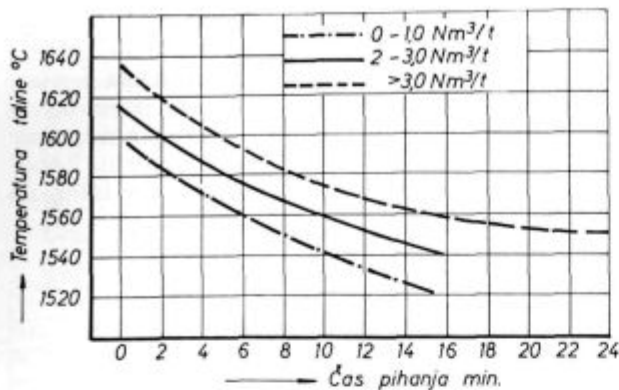
T je temperaturni padec na tono  
 Q<sub>a</sub> je potrebna toplota v kcal  
 G<sub>s</sub> je teža šarže v kg  
 C<sub>s</sub> je spec. toplota v kcal/kg

Na osnovi te formule je izračunal in izmeril, da je padec temperature jekla pri pretoku 2 Nm<sup>3</sup> argona bil 3,5 °C na tono in nato pri pretoku 4 Nm<sup>3</sup> argona 7,0 °C na tono.

Iz tega je razvidno, da padec temperature pada z naraščajočo količino pretoka argona. Na sliki 4 je prikazan padec temperature taline v odvisnosti od časa pihanja in količine argona.

Na tabeli 1 je prikazana razlika med prepihano in neprepihano šaržo teže 10 ton kvalitete 53 MnSi 4.





Slika 4  
Padec temperature v času pihanja

Tabela 1

	Temperatura šarže v °C z prepihanja z argonom	Temperatura šarže v °C brez prepihanja z argonom
Prebod iz elektro obločne peči	1630	1630
V ponovci po izlitju iz peči	1610	1610
Po 2. minuti pihanja v ponovci	1575	—
Po 4. minuti pihanja v ponovci	1555	—
Ob končanem pihanju	1550	—
Ob zadnjem vlišanju	1540	1580

Razlika ob zadnjem vlišanju je 40 °C.

Choulet<sup>6)</sup> je s svojimi sodelavci izvršil veliko število poizkusov pihanja z argonom. Delal je na šaržah teže 11 do 40 ton, padec temperature je bil 20 do 33 °C, ako ponovca ni bila pregreta (cca 150 °C). V primeru, ko je ponovco pregrel na 700 °C, je padec temperature znašal največ 22 °C.

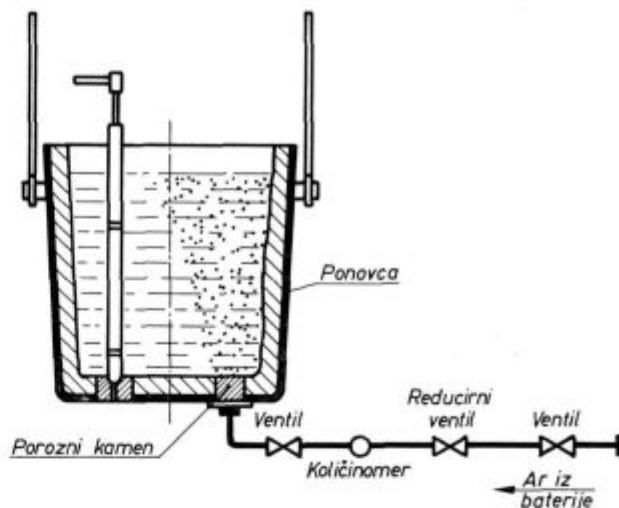
Dalje so zanimivi poizkusi, ki dokazujejo, da ne smemo zanemariti izgube toplote jekla zaradi odkrivanja taline v ponovci. Pri pihanju se namreč zelo težko obdrži pokrita talina. Običajno se ta odkrije že pri tem, ko argon prebije ferostatični pritisk jekla. Navajam primer temperaturne izgube na 20-tonski šarži, odliti v ponovco, ki se je takoj po odlitju pokrila z obzidanim pokrovom.

Tabela 2

Kvaliteta jekla	Temperatura šarže pred pihanju z argonom °C	Temperatura šarže po pihanju z argonom °C	Čas pihanja minute	Količina vpihanega argona Nm <sup>3</sup>
St 37.11	1580	1555	12	9
40 Mn 4	1580	1550	10	20

Razlika je le 25 in 30 °C.

Več avtorjev navaja vpliv obzidave ponovce na izgubo toplote ter priporoča obzidavo zunanjega venca ponovce s polizolacijsko opeko in zavrača oziroma celo odklanja obzidavo z boksitno in korundno opeko.



Slika 5  
Princip montaže kamna in cevodov

## MONTAŽA CEVOVODOV IN REGULIRANJE PRITISKA

Na sliki 5 je prikazan princip montaže poroznega kamna v ponovco. Argon se iz rezervoarja ali baterije vodi do glavnega ventila nato preko reducirnega ventila in količinomera na osnovni ventil, to je regulirni membranski ventil. Z zadnjim ventilom, ki ima tudi tlakomer, se regulirata količina in tlak argona, tako da je pihanje možno voditi po predpisanih diagramih. Pri izdelavi instalacije dovoda argona lahko uporabimo železne **plinotesne** cevi, da nam ob pihanju argon ne uhaja oziroma da v času mirovanja v cevi ne difundira zrak iz okolice. Spoji med cevmi naj bodo zavarjeni in tako si za stalno zagotovimo plinotesnost in točne meritve. Šivne cevi se lahko uporabijo, vendar se morajo pred uporabo pregledati na tesnost z znanimi metodami z milnico ali nafto. Notranja površina mora biti očiščena rje in maščobe, zato se jih mora pred montažo oprati v eni izmed kemikalij, ki so namenjene za čiščenje cevodov kisika. Le tako očiščene in pregledane cevi zagotovijo nemoteno delo pri vpihavanju argona.

**Dimenzioniranje** cevodov je podobno kot pri vseh cevodih, le da se upošteva specifičnosti. Potrebno je upoštevati vse dolžine, upore, ventile in končno upor v poroznem kamnu za vpihovanje argona ter ferostatični pritisk jekla. Osnovna zahteva je želena količina argona, ki naj bi na minuto prešla skozi cevod; od tu računamo dalje. Podatki, ki jih potrebujemo, so:

- količina argona na minuto skozi jekleno talino,
- pritisk ob vstopu v ponovco,
- vsota vseh uporov na celotni napeljavi od baterije do ponovce.

Ko imamo izračunani presek cevi, si izberemo standardni presek, ki je večji od izračunanega pre-

seka za 20 do 25 %. Dalje moramo pri računu upoštevati dolžino cevovoda. Posebno pomembno je to za dolge cevovode, ker so v bistvu nekak rezervoar plina. V primeru, da je cevovod dimenzioniran na spodnji meji, bo pritisk plina hitro padel ter povzročil nihanje pritiska, kar je za enakomerno gibanje — strujanja taline v ponovci zelo škodljivo. Ventili in kolena nudijo upor, ki ga izrazimo v metrih dolžine cevi.

Na primer:

Presek	1. koleno	1. ventil
10	0,25 m	1,25 m
20	0,50 m	2,50 m
25	0,65 m	3,13 m
30	0,75 m	3,75 m
40	1,00 m	5,00 m
50	1,25 m	6,25 m

Ravno tako navajajo potrebne pritiske argona pod ponovco v odvisnosti od teže šarže:

Teža šarže	Potrebni pritisk pod ponovco
10 ton	2,5 atm
20 ton	2,7 atm
30 ton	3,0 atm
40 ton	3,0 atm
60 ton	3,3 atm
80 ton	3,7 atm
100 ton	4,0 atm

in izgube pritiska pri preobodu skozi kamen:

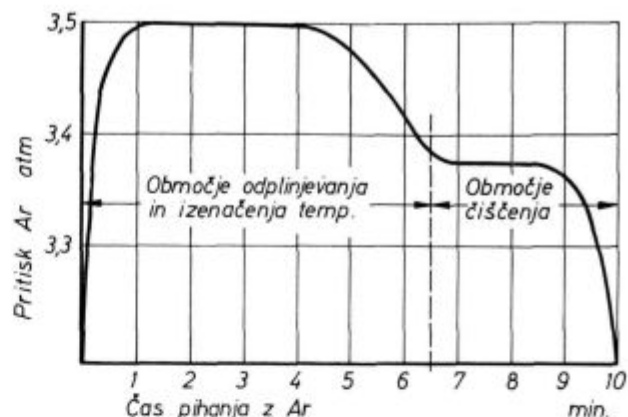
pritisk pod ponovco, atm.	izguba pritiska, atm						
	1	2	3	4	5	6	7
0,01	0,04	0,1	0,15	0,2	0,28	0,32	
pretok argona, l/min.	950	1750	2500	3200	3750	4300	4600

Pri normalnem delu je odstopanje pritiska možno za  $\pm 10\%$ . Ako je porozni kamen onečiščen, površina deloma zakrita z žilindro ali železom, so potrebni večji pritiski. Nasprotno pa z izrabljenostjo kamna, ko je vedno tanjši, potrebni pritisk pada.

Za izračun notranjega preseka cevi z upoštevanjem navedenih opozoril, se je najbolje poslužiti kompleksnega diagrama, ki ga navaja knjiga »Argon in der Metallurgie — BASF, 1966«

Pri reguliranju pritiska se moramo strogo držati osnovnega principa, ki ga navaja slika 6. Čeprav mora biti princip za vse enak, je razumljivo, da mora vsak jeklar ugotoviti s poizkusom, kateri odnos in pritisk je najbolj primeren za njegovo po-

novco, kvaliteto jekla in temperaturo. Predvsem se ne smejo delati napake, da pritisk močno niha ali da pihamo samo prvo območje (izenačevanje)



Slika 6  
Pritisk Ar plina v času pihanja za obe območji

brez območja čiščenja. Po navadi se to pripeti, ako se med pihanjem na hitro odločimo za krajši čas pihanja. Tak način ne more dati dobrega rezultata in je lahko celo škodljiv.

Posebno pozornost je posvetiti prehodu iz prvega na drugo območje ter na zaključek pihanja. Prehodi morajo biti enakomerni in blagi, zato mora delovodja med regulacijo poleg taline stalno opazovati tudi tlakomer in z občutkom voditi regulacijo. Najbolje je, da regulacijo opravlja avtomatika, saj je najbolj zanesljiva.

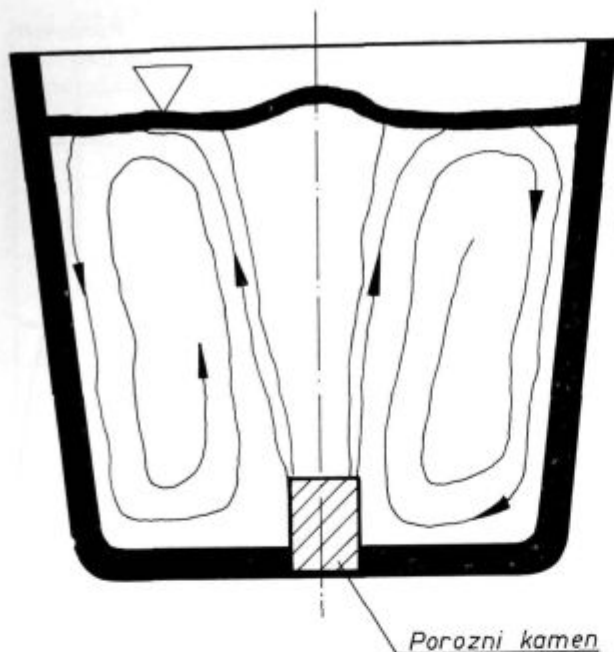
Vse to pa izvajamo le, ako je instalacija pravilno dimenzionirana. V zimskem času nastopajo težave, ako oddelek, kjer so montirane baterije, ni ogrevan. Mraz v oddelku kakor tudi neenakomerni odvzem plina iz baterije povzroči zamrznjenje cevovodov na malih presekih, zato se morajo ti preseki dodatno ogrevati s parnimi spiralami in prostor segrevati na  $+15^{\circ}\text{C}$ .

Tako si bomo prihranili marsikatero nevšečnost in omogočili redno in kvalitetno delo.

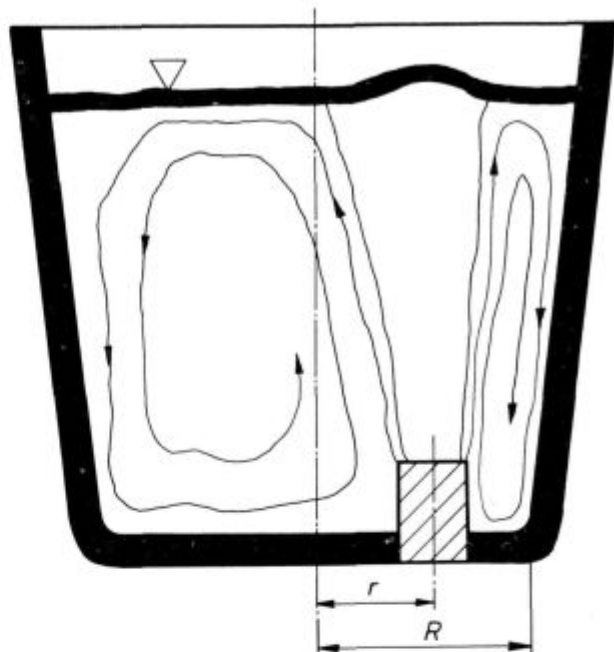
Po zahtevah naših varnostnih predpisov se baterije jeklenk ne smejo montirati v vročih obratih, ne pod mostnimi ali portalnimi žerjavi, gretje mora biti izvedeno s paro, toplo vodo ali eventualno električno, toda z zaprtimi grelci. Vsi spoji na instalaciji baterije morajo biti atestirani in izvedeni po merodajnih predpisih.

## POLOŽAJ IN MONTAŽA POROZNEGA KAMNA

Kje in kako montiramo porozni kamen, ni vseeno, ker je ugotovljeno, da položaji kamna na sredini dna ponovce ali na robu dna niso ugodni in ne dajo dobrih rezultatov — slika 7 in slika 8. Dokazano je, da dobimo najboljše rezultate v položaju, ki ga kaže slika 9. To je nekoliko odmaknjen od stene ponovce ali točno izmerjeno na prvi četr-

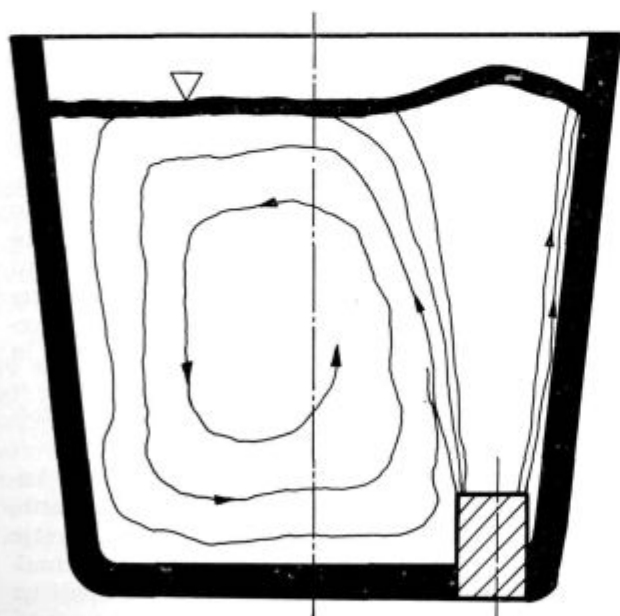


Slika 7  
Strujanje taline v ponovci, kjer je kamen montiran  
v sredini



$$\frac{r}{R} = 0,5$$

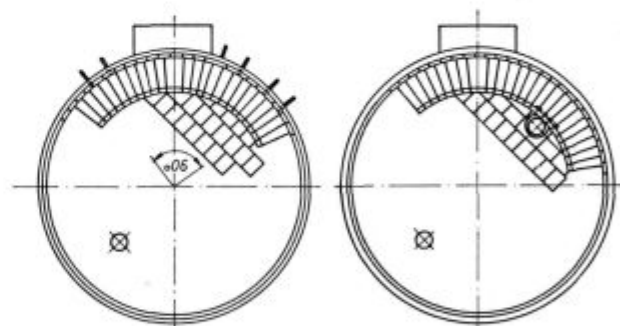
Slika 9  
Strujanje taline v ponovci, kjer je kamen montiran  
na položaju R2



Slika 8  
Strujanje taline v ponovci, kjer je kamen montiran na robu

tini premera dna ponovce. Ko je načrtan delilni krog, se izbere točni položaj, ki ne sme biti na takem področju dna, kjer pada curek jekla v ponovco. Curek jekla ima veliko moč in s svojim pritiskom pospeši predor jekla skozi režo med kamnom in školjko. Porozni kamen mora biti vžidan diagonalno nasproti izlivku, slika 10, tako, da ni dodatno obremenjen. Ravno tako na to mesto ne smejo padati dodatki, ki se običajno mečejo na dno ponovce (FeSi), ker lahko mehansko po-

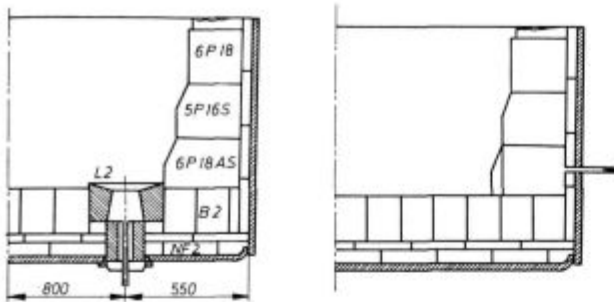
škodujejo porozni kamen s silo udarca, ga okrušijo ali povzročijo razpoke. Slika 11 kaže v preseku ponovce primer zidanja poroznega kamna na dnu in na steni ponovce. V železarni Ravne nismo uporabljali principa montaže v steni, ker nam je bilo že znano iz literature, da ta princip zahteva prvo-



Slika 10  
Položaj kamna napram položaju izlivka — tloris

vrstno šamotno opeko, sicer naraste število nekovinskih vključkov, poleg tega pa ta položaj, kot že rečeno ni ugoden za strujanje taline.

Pri montaži v dno ponovce, kot kaže slika 11, je potrebna velika pozornost in pedantno zidanje, sicer bo nastal predor jekla. Strujanje jekla okoli poroznega kamna je zelo močno in jeklo izpira malto ter se zagriže med kamen in školjko, zato mora biti to delo temeljito opravljeno. Pri montaži argona kamna moramo paziti na naslednje:



Slika 11

Način vzidanja kamna v dno ponovce in steno ponovce – presek

— da leži zgornji rob v isti ravnini kot rob školjke, kajti ako je kamen pogreznjen, bo v poglobljenem delu jeklo zamrznilo in preprečilo pihanje;

— da ne štrli kamen iz školjke, ker ga bo strujanje jekla hitro obrabilo in eventualni mehanski udarci (FeSi) poškodovali;

— da imata školjka in kamen okrogli presek in ne ovalnega. S tem preprečimo enostransko montažo in nevarnost, da reža med kamnom in školjko ni dobro tesnjena (nevarnost predora);

— da školjka ni počena. Posebno nevarne so razpoke, ki izhajajo iz centra školjke. Običajno so te razpoke posledica enostranskega pečenja ter v njih nastopajo napetosti. Zato moramo školjko, ki nosi porozni kamen, temeljito pregledati pred montažo in tudi po segrevanju v sami ponovci, kajti pogosto počí školjka med ogrevanjem;

— da se uporablja predpisana specialna malta, ki ima to lastnost, da je visoko ognjestalna in se pri višjih temperaturah širi ter tako zanesljivo drži. Železarna Ravne uporablja »SIMTECK« od firme Stoecker Kunz, Krefeld in ima z njim zelo ugodne rezultate;

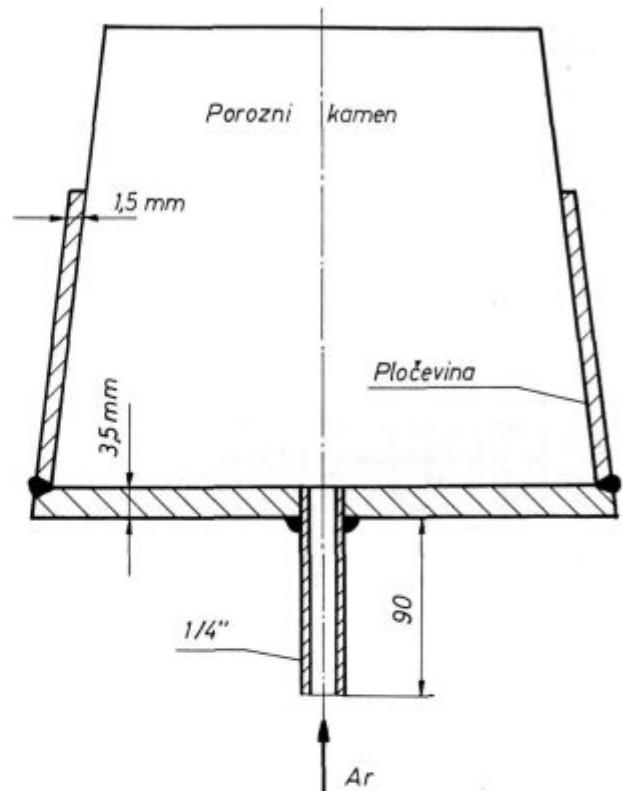
— da malte uporabljamo čim manj ter da se višek malte iztisne pri vstavljanju v školjko. Malto nato skrbno odstraniti, ne pa premazati po površini poroznega kamna;

— da s posebno malto obzidamo tudi školjko in podlago pod školjko. Ne uporabljati navadne malte, ki za te zahteve ni zanesljiva.

## IZGLED IN ZAHTEVE POROZNEGA KAMNA

Dimenzijski izgled poroznega kamna je lahko različen, obstajajo valjasti, kockasti, ploščati itd. Dimenzije kamna so odvisne od načina uporabe, to je od naročnika samega. Železarna Ravne uporablja obliko presekanega stožca, ker montiramo kamen direktno v odprtino školjke, ki se vgradi v dno ponovce. Stožčasta oblika je tudi najbolj primerna za montažo, saj se da tesno vložiti v školjko. Slika 12 prikazuje, da moramo porozni

kamen obložiti z navadno črno pločevino do dvetretjinske višine, na spodnji strani pa dno ojačati s pločevino. Dovodna cev je 1/4 cole ali 1/2 cole, kar zadostuje za dovod argona. Dvetretjinska obloga, plašč kamna ima namen, da se usmeri argon po poti kamna, sicer se nam bi izgubil po režah in ob plašču ponovce. Zato mora biti plašč zavarjen po celem obodu in ne samo na nekaterih mestih. S tem prisilimo argon, da se mora usmeriti skozi



Slika 12

Oplaščenje poroznega kamna

kamen in na površini kamna izstopati v obliki malih mehurčkov, to pa tudi od njega zahtevamo.

Ako bi ves argon izhajal samo med kamnom in plaščem iz pločevine (že itak ga gre 40–50 %), bi dobili velike mehurje, ki bi svoje delo slabo opravljali, trgali žlindro na vrhu taline in talino le temperaturno izenačevali, ne pa tudi čistili vseh vključkov in plinov. Efekt flotacije bi pri velikih mehurjih skoraj popolnoma odpadel, saj je ta učinkovit le pri velikem številu malih in drobnih mehurčkov. Tudi difuzija med mehurčki argona in škodljivimi plini v jeklu je slabša, ako so ti veliki<sup>3)</sup>.

Od poroznega kamna zahtevamo naslednje lastnosti:

— visoko ognjestalnost in odpornost proti obrabi v vročem,

— visoko poroznost in tako obliko porozitete, da bodo mehurčki fino razpršeni,

— zadostno kapaciteto propustnosti, da zadostuje za predvideni postopek.



Zahteve niso ravno majhne in zato je nevarno uporabljati navadne slepe izlivke, ker le-ti niso zanesljivi niti ni delo varno (predor). Vzdržnost poroznih kamnov je različna, ker je odvisna od procesa, temperature in načina čiščenja dna ponovce. V železarni Ravne so že zdržali 15 šarž, vendar je najbolje, da se ga zamenja pri 12 šaržah, saj tako zdržita dva kamna eno vzdržnost ponovce.

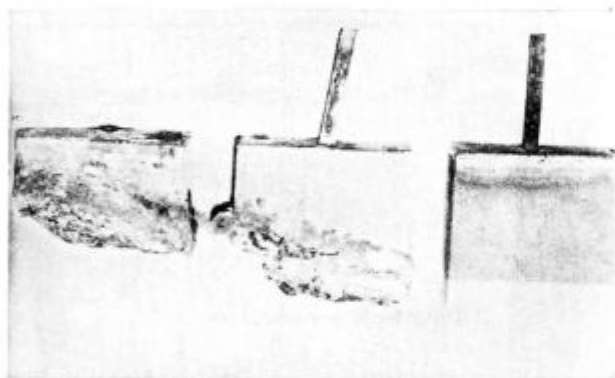
Po navadi kamen, ki je že bil vgrajen, pa čeprav ima še malo preprianih šarž, ni več zanesljiv in je bolje, da se ga zamenja. Smatramo, da sta dva kamna na eno ponovčno vzdržnost zadovoljiva rešitev.

Kvaliteta poroznih kamnov, ki jih proizvaja firma Stoecker-Kunz, Krefeld, je po njihovih podatkih naslednja:

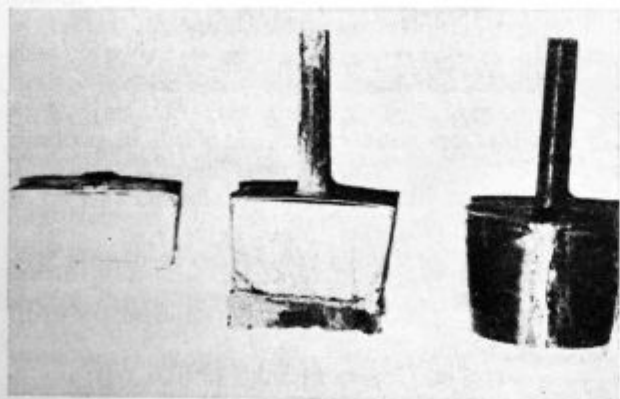
Oznaka	Obstojnost proti temperaturnim spremembam	Ognjestalnost	trdnost v vročem	trdnost v hladnem	Poroznost
Typ 20 toplj. mulit	preko 40 sprememb	1865° C	1500° C 2 kp/cm <sup>2</sup>	184 kp/cm <sup>2</sup>	23,1 %
Typ 307 Magn. oksid	3 spremembe	1930° C	1535° C 2 kp/cm <sup>2</sup>	180 kp/cm <sup>2</sup>	25,6 %

Po sestavi se izdelujejo porozni kamni iz taljenega mullita, silicijdioksida in magnezitoksida. Mullit je 70 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 30 % SiO<sub>2</sub>. Za jeklarje pridejo v poštev le porozni kamni, ki so izdelani iz topljenega mullita. Metoda merjenja obstojnosti proti temperaturnim spremembam (t. z. toplotni udar) se vrši tako, da se poizkusni vzorec razžari na 950 °C (ca. 15 minut) in nato ohladi v curku

tekoče vode. Ostali preizkusi so izvajani po DIN normah. Na sliki 13 in 14 je prikazan izgled poroznih kamnov v različnih fazah uporabe. Vidi se sloj, v katerem je že penetriralo jeklo ali žlindra in deloma rušilo keramično vez, ta sloj temne barve bo pri naslednji šarži odpadel za ca. 1/3 debeline. Pod tem slojem je področje normalnega mullita, temni sloj ni ostro ločen in se prepleta s še zdravo osnovo. Kljub temu, da je temni sloj penetriran z žlindro in jeklom, še vedno normalno prepušča argon, včasih celo z manjšim uporom.



Slika 13  
Izgled uporabljenega kamna



Slika 14  
Izgled uporabljenega kamna

#### REZULTATI PIHANJA ARGONA

V železarni Ravne smo uvedli uporabo argona za preprihanje taline že leta 1967 in se po prvih poizkusih že redno uporablja. V začetku smo pihali s krajšim časom in manjšimi pritiski, ker smo šele osvajali tehniko načina dela, kasneje smo prešli na večje pritiske in daljši čas pihanja.

Pihanje nam je dalo zelo čisto vlivanje in omogočilo vlivanje pod nižjimi začetnimi temperaturami. To je omogočeno zato, ker je padec temperature po pihanju z argonom znatno manjši, poleg tega je curek jekla čist in nima oksidne mreže na površini. Ker je padec temperature manjši (izenachenje), je omogočeno normalno litje od začetka do konca vlivanja, medtem ko smo do sedaj vlivali nekoliko prevročje v začetku in na koncu nekoliko hladno. Tudi skorje strjenega jekla na dnu ponovce so sedaj zelo redke, saj ostane jeklo tekoče zelo dobro do zadnjega ingota.

Na splošno je ugotovljeno, da so zelo ugodni rezultati predvsem pri jeklih za kovačnico, pri šaržah, izdelanih na eno črno žlindro, in pri jeklih, ki jih izdelujemo z metodo preddezoksidacije s ferroaluminijem (FeAl) v peči. Čeprav da metoda s FeAl na splošno boljše rezultate, jih s preprihanjem še dodatno izboljšamo.

Odkovki iz kovaških ingotov, ki so vliti po preprihanju z argonom, so vsi brezhibni, brez napake

ter ultrazvočna preiskava ne registrira nobenega odklona. Nekaj več težav je pri trdih legiranih (CrMo) jeklih, kjer obstaja večja možnost, da so šarže izlize s karbidno žlindro oz. s temperaturo na spodnji livni meji.

Raziskave še niso zaključene in se nadaljujejo tako v smeri razvoja metode pihanja kakor tudi preiskav materiala. Raziskave še niso končane, vendar nas ugodni rezultati vzpodbujajo k nadaljnjemu razvoju in izpopolnitvi tehnologije in kvalitete jekel, ki jih izdeluje železarna Ravne.

## IZKUŠNJA ŽELEZARNE CRUCIBLE STEEL, USA

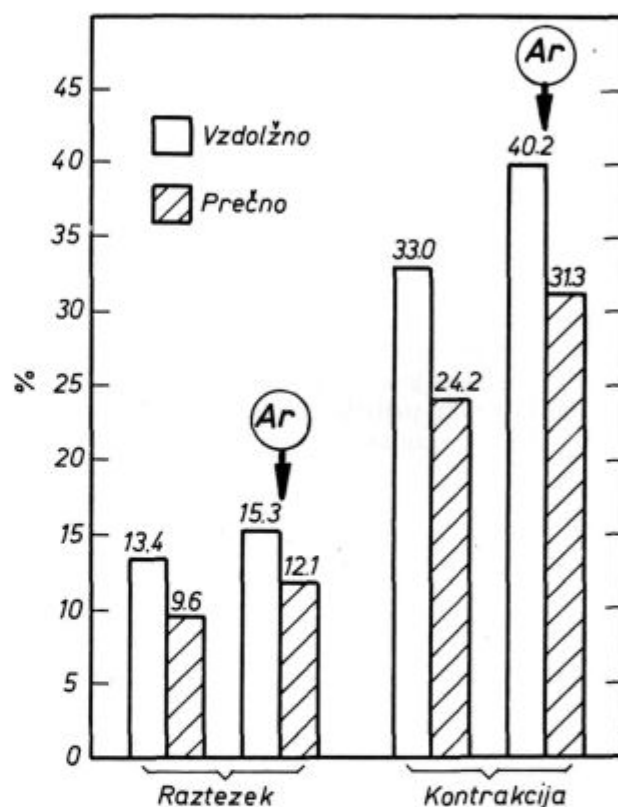
Za našo železarno so izkušnje navedene železarne in železarne Syracuse, New York v ZDA zanimive, saj imata podobne peči (30 ton) in program. Že leta 1964 so začeli intenzivno preizkušati metodo prepihanja jekla z argonom. Iskali so cenejši postopek vakuumu, ki bi jim delno izboljšal kvaliteto jekel.

Začeli so z načinom dovoda argona skozi steno ponovce tik ob dnu. Skozi prebito steno so vložili keramično cevko in jo obzidali in naphali z ognjestalnim materialom. Po vsaki šarži so morali obnavljati, zato je bilo zelo drago in zamudno (več ur) ter je močno eroziralo oblogo. Zaradi slabega efekta so to kmalu opustili in prešli na metodo pihanja skozi dno preko poroznih kamnov. Najprej so uporabljali en kamen, nato tri, vendar z rezultati, čeprav niso bili slabi, niso bili zadovoljni in po čaa dveh letih so se zopet vrnili k prvotnemu načinu t. j. pihanje skozi steno ponovce. Ključki prekinitve uporabe metode »skozi dno« so po njihovih navedbah naslednji:

- količina prepihanega argona je bila za njihove zahteve premajhna.
- erozija kamnov pri največjem pretoku je bila tako velika, da so vzdržali komaj 4 šarže,
- kamni so se pri čiščenju ponovce drobili (slaba kvaliteta),
- zahteve odstranitve vodika niso dosežene v celoti,
- stroški pri tej vzdržnosti so bili previsoki.

Za izpopolnjen nekdanji postopek pihanja »skozi steno« ponovce, jim je firma »LINDE, D. of U. C. Corp. Newark, USA izdelala pihalno šobo v obliki valjastega poroznega kamna in vse potrebne priključke. Pihalica je nameščena za eno višino opeke nad dnom in usmerjena tako, da event. podaljšani curek ne doseže zamašnega droga. Pihalica sestoji iz več delov, ki so ali stalno na ponovci ali se menjajo po vsaki šarži. Deli, ki se menjajo, se pripravijo in posušijo ter ogrevajo v sušilni peči. Menjava pihalice po vsaki šarži traja 30 minut, menjajo se: valjasti porozni kamen — pihalica, cev okoli kamna, glava zamaška in oporna plošča. Po vsaki

šarži se zamenja z novim samo kamen — pihalica, ostalo po potrebi. Valjasti kamen štrli v notranjost ponovce ter se dobro upira eroziji. Poskušali so različne dolžine, vendar so najboljše rezultate pokazali kratki valji z zaokroženimi robovi. V primeru, da šarže ne nameravamo prepihavati, se odprtina začepi s čepom iz šamota. Argon pihajo s pritiskom 12,5 atm, kar je za naše pojme ogromno, in količino nad 15 Nm<sup>3</sup> na tono jekla. Ker je pritisk velik, ne potujejo mehurčki ob steni, ampak se razporedijo po velikem obsegu. Zaradi velikega pritiska so tudi fino razpršeni ter dobro odstranjujejo pline in vključke. Pihati pričnejo



Slika 15

Crucible Steel — Izboljšanje mehanskih lastnosti jekla s prepihanjem taline z argonom

takoj, ko priteče jeklo v ponovco iz peči, po izlitju iz peči ponovco pokrijejo z obzidanim pokrovom in pod pokrovom tudi pihajo. Rezultati po njihovih podatkih so zelo ugodni, posebno glede kisika in dušika, saj so rezultati blizu rezultatov vakuumiranih šarž, le na področju vodika se kljub velikim količinam argon ne more primerjati z vakuumom, pa čeprav so močno znižali vodik. Zatrjujejo, da so kljub temu odpravili kosmiče v gredicah utopnega jekla, izboljšali vzdolžno in prečno žilavost (slika 15) znižali število oksidnih in silikatnih vključkov (slika 16) in znatno zmanjšali celotni izmeček.

	A Sulfidi	B Alu- minati	C Silikati	D Globularni oksidi
Brez prepihanja	2 ½	1	1	2 ½
Prepihano z argonom	2 ½	0	0	1 ½

Slika 16  
Crucible Steel — Znižanje vključkov po prepihanju taline  
z argonom

Da dosežejo boljši učinek odplinjevanja z argonom, izpuščajo šarže z nižjim Si pod 0,20 % in šaržo preddeoksidirajo s FeAl v peči, tako da pridejo v ponovco le sledi Al. Temperaturo dvignejo za 20 do 40° C v odvisnosti od vrste jekla. Zlindre zadržijo v peči čim več, ker s tem preprečijo razjedanje obloge ponovce in droga ter dodatne vključke v jeklo (pokrita ponovca). Sedaj prepihajo orodna, utopna jekla in jekla za kroglične ležaje. Uporabnost prepihovanja pa ugotavljajo na drugih jeklih in na vseh, kjer imajo težave. Asortiment jekel, ki se prepihuje, je vedno večji in trdijo, da njihove raziskave še niso zaključene. Postopek, ki so ga uvedli v redno uporabo že leta 1967, je zanimiv, ker jim je uspelo prepihati velike količine argona in velike pritiske skozi dno »pihalico« ter doseči ugodne rezultate.

### STROŠKI UPORABE ARGONA ZA PREPIHOVANJE

Stalni stroški in cene	N din
1 kos porozni kamen Stoecker - Kunz . . . . .	71,50
1 kg ognjest. vezivo — Simteck . . . . .	5,50
1 kos jeklenka argona . . . . .	250,00
1 kos oplačenje arg. kamna . . . . .	3,50

Tabela 3

Št. šarže	Kvaliteta	Temperatura ob prebodu °C	Čas pihanja min.	Kisik v talini		
				pred prebodom	pred pihanjem	pihanju po
22 613	CK 25	1650	8	0,0156	0,0149	0,0068
22 616	CK 25	1650	7	0,0162	0,0140	0,0091
22 618	CK 45	1640	7	0,0123	0,0126	0,0070
22 877	CK 35	1650	7	0,0105	0,0118	0,0052
22 873	CK 25	1650	7	0,0155	0,0113	0,0042
22 887	CK 60	1640	7	0,0103	0,0114	0,0057
23 177	CK 25	1650	6,5	0,0164	0,0089	0,0036
23 125	CK 25	1660	7,5	0,0182	0,0081	0,0055
23 189	CK 25	1650	7,0	0,0152	0,0080	0,0039
23 127	CK 25	1660	7,5	0,0164	0,0084	0,0030

### Stroški na tono jekla

	N din
investicije . . . . .	0,022
porozni kamen . . . . .	0,250
simteck vezivo . . . . .	0,020
argon . . . . .	4,000
Skupno:	4,292
	ali zaokroženo: 4,30

### Primerjava stroškov med posameznimi podjetji

Edelstahlwerk Krefeld, Zah. Nemčija . . . . .	3,50 N din
Stahlwerk, Neunkirchen, Avstrija . . . . .	4,40 N din
Stahlwerk, Neunkirchen, Avstrija . . . . .	4,45 N din
Železarna Ravne, tovarna plemenitih jekel . . . . .	4,30 N din

Upoštevati moramo, da pihamo še premajhne količine argona in ko bomo povečali količino plina, se bodo stroški dvignili na 5,30 N din/tono. Šele ko bomo uporabljali tekoči lastni argon, se bodo stroški znižali na predvidenih **4,10 do 4,20 N din/tono.**

### REZULTATI PREISKANIH ŠARŽ V ŽELEZARNI RAVNE

Po osvojitvi metode in tehnike dela z organsko instalacijo in regulacijo pihanja argona smo skupno z Metalurškim inštitutom raziskovali efekt prepihovanja šarž z argonom. Analizirali smo predvsem količino topnega Al, količino O<sub>2</sub>, oksidne spojine in vodik ter dušik. Na naslednjih tabelah je to prikazano za 10 poizkusnih šarž.

Na osnovi rezultatov, ki so prikazani na tabelah, razvidno, da so že pri razmeroma majhni količini prepihanega argona doseženi ugodni rezultati, občutno znižan celotni kisik in SiO<sub>2</sub> spojine v vključkih ter Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> spojine.

Upoštevati moramo, da se je prepihanje vršilo pri pritisku 2—4 atm in 1,5—1,8 atm v času 7—8 minut. Faza čiščenja, ki se je izvajala v času

Tabela 4

St. šarže	Vključki pred pihanjem		Vključki po pihanju		Topni aluminij %
	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	
22 613	0,003	0,021	0,001	0,006	0,019
22 616	0,005	0,016	0,005	0,009	0,010
22 618	0,004	0,017	0,004	0,009	0,019
22 873	0,007	0,011	0,002	0,005	0,009
22 877	0,006	0,010	0,001	0,004	0,008
22 887	0,003	0,015	0,002	0,005	0,017
23 117	0,004	0,013	0,002	0,004	0,016
23 125	0,004	0,012	0,003	0,005	0,016
23 189	0,003	0,012	0,001	0,005	0,013
23 127	0,002	0,014	0,002	0,004	0,032

Tabela 5

St. šarže	Vodik H cm <sup>3</sup> /100 gr			Dušik N %		
	1	2	3	1	2	3
22 613	6,0	3,9	5,2	0,0067	0,0061	0,0063
22 616	5,6	4,9	5,0	0,0069	0,0063	0,0078
22 618	4,5	3,5	4,0	0,0080	0,0082	0,0087
22 873	11,4	10,6	7,6	0,0073	0,0070	0,0079
22 877	6,6	7,3	5,8	0,0069	0,0061	0,0077
22 887	7,6	7,0	7,0	0,0063	0,0066	0,0074
23 117	5,9	5,0	5,3	0,0063	0,0074	0,0088
23 125	6,0	3,5	6,2	0,0078	0,0076	0,0089
23 189	3,3	2,8	3,4	0,0082	0,0083	0,0089
23 127	4,5	4,7	4,5	0,0071	0,0074	0,0085

1 — vodik — dušik iz taline v ponovci pred pihanjem

2 — vodik — dušik iz taline v ponovci po pihanju

3 — vodik — dušik v izdelanem jeklu

3—4 minute, kar je sorazmeroma malo. Zaradi gibanja taline v ponovci, ki je posledica pretoka velikega snopa drobnih mehurčkov argona in dna ponovce proti vrhu, se je povečal delež čiste plinske dezoksidacije. Ta vpliv je tudi delno povečal izločanje SiO<sub>2</sub> spojin, predvsem pa povečal izločanje Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> spojin.

Že ko smo si zastavili nalogo uvesti prepihanje argona, smo se zavedali, da ne smemo pričakovati znižanja vodika in dušika pri tako malih količinah. Ako pa pregledamo rezultate na tabeli za vodik in dušik, vidimo, da je pri večini šarž le zabeležen padec vodika in deloma tudi dušika. V primeru, da ne upoštevamo šarž, pri katerih je vodik narastel — možnost napake pri jemanju vzorca — dobimo poprečno znižanje vodika za 12—15 %, znižanje dušika pa za 4—7 %. Značilno je tudi, da je padec vodika znaten pri velikih količinah nad 6,0 cm<sup>3</sup>/100 gr. Poleg zmanjšanja kisika,

vodika in znižanja SiO<sub>2</sub> in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> spojin v vključkih, je dosežena tudi boljše razporeditev vključkov, kar ima ugoden vpliv na mehanske lastnosti jekel. Razpored in oblika vključkov sta taka, da ne morejo škodovati v taki meri kot običajno. Rezultat vseh navedenih izboljšanj se je najbolje odrazil v znatnem zmanjšanju jeklarskega izmečka.

#### Literatura

1. Karel Feindl, Wärmeübergang an Argonblasen in Stahlschmelzen. Interner Bof-Report, 1966.
2. BASF, Argon in der Metallurgie, 1966.
3. W. Deilmann — Radex Rundschau, Heft 2, 1968.
4. Walster M., Lange W., Evers, Hilpert A. Bericht über Argonspülversuche der Forschungsabteilung der Rhein-stahl-Hüttenwerke, Hattingen 1966.
5. R. D. Weller, Argon degassing at Crucible Steel. The Magazine of metals producing, June 1968.
6. Choulat R. J., Holmes R. L., Chrzan L. R. — Argon Degassing Practice and Results. — J. of Metals, 1966.



## ZUSAMMENFASSUNG

Das Durchblasen der Stahlschmelze mit Argon in der Pfanne verbessert die mechanischen Eigenschaften, vermindert den Gehalt der schädlichen Gase und nichtmetallischen Einschlüsse im Stahl. Es kann zwar nicht eine Vakuumbehandlung ersetzen, obwohl es mit einer richtigen Ausnutzung der theoretischen Grundlagen und der praktischen Erfahrungen die Qualität des Stahles verbessert. Das Argondurchblasen des Stahles in unserem Stahlwerk hat sich besonders günstig bei den Schmiedestählen, welche in Kokillen von einem grossen Querschnitt gegossen werden, erwiesen. Die Ultraschallprüfungen zeigen jetzt kleinere Abweichungen, oder gibt es gar keine.

Für die weitere Qualitätsverbesserung muss die Menge und der Druck des durchgeblasenen Argons vergrössert und eine billigere Argonquelle gefunden werden (verflüssigtes Argon). Mit den weiteren Versuchen muss der Gebrauch des Argondurchblasens auch für weitere Qualitäten festgestellt werden. Die Stähle sollen dann für die Wakuumbehandlung so wie für das Argondurchblasen in Bezug auf die Qualität und die Wirtschaftlichkeit geteilt werden. Die Forschungen im Hüttenwerk Ravne werden weiter geführt.

## SUMMARY

Flushing of cast steel with argon improves mechanical properties of steel, and reduces the content of harmful gases and inclusions. This method cannot substitute vacuum degasing, but steel quality is anyhow improved if theoretical fundamentals and practical experiences are correctly used. Use of argon in our steel works gave favourable results especially with steels for forging which are cast into big ingots. Ultrasonic tests show now very small peaks or no peaks at all.

For further improvements of quality, amount and pressure of flushing argon must be increased, and a cheaper source of argon — purchase of liquid argon — must be found. Further investigations must show applicability of flushing also for other steels, which were not yet flushed, so that steels can be distributed into two groups: steels suitable for flushing and steel which had to be vacuum degased, according to the quality and economy of the method. Investigations in Iron and Steel Works Ravne are proceeding.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод продувания расплавленной стали с аргоном улучшает механические свойства стали и уменьшает содержание вредных газов и включений. Но, не смотря на это, этот метод не может заменить способ обработки стали в вакууме хотя с правильным применением теоретических и практических достижений улучшает качество стали. Применение аргона в сталеплавильном заводе Равне (Zelezarna Ravne, Ravne) дало положительные результаты в особенности при сталях предназначенных дляковки которые разливаются в изложницы большого формата. Проверка слитков с ультразвуком показала незначительные отклонения, или же отклонения

вообще не обнаружены. Для дальнейшего улучшения качества стали надо увеличить количество и давление вдутого аргона; также надо подыскать источник более дешевого аргона, нпр. снабжение с жидким газом. В дальнейшем исследовании надо определить целесообразность этого продувания при других сортах стали при которых продувка ещё не была выполнена и, наконец, в соответствии качества и экономичности, составить классификацию сталей для продувания и отдельно для обработки в вакууме. Исследования в металлургическом заводе Равне продолжаются.

## Elektroenergetski ter obratovalni odnosi obločne peči za proizvodnjo jekla

Poznavanje elektrotehničnih, energetskih in produktivnostnih razmer elektro obločne peči za pridobivanje jekla je važno za eksploatacijo kakor tudi za dobavitelja električne energije. Elektro obločna peč je enostavna, cenena in visoko produktivna naprava za proizvodnjo jekla, ki je kljub svoji popolnosti še vedno predmet izpopolnitev tako v konstrukcijskem kot v tehnološkem pogledu. Za nami je že razpotje, kjer so se ločile visoko produktivne obločne peči za proizvodnjo masovnih jekel od klasičnih obločnih peči za visoko kvaliteten program konstrukcijskih, orodnih in ognjeodpornih jekel. V domačih razmerah klasičnega obratovanja obločnih peči je še vedno aktualno vprašanje optimalnih režimov obratovanja tako v času taljenja kot pri raztaljenem vložku. Z analizo stanja elektrotehničnih parametrov se da obločna peč ob dobrem poznavanju teoretičnega ozadja uglasiti ugodnim ali celo najugodnejšim proizvodnim pokazateljem. Kaj nam ob tem lahko prispevata vpeljan tehnološki red in dobra organiziranost, se vse premalo zavedamo.

Kvalitativne in kvantitativne relacije, navedene v tem članku v poglavjih: Elektrotehnični parametri peči, Peč kot elektroenergetski potrošnik, Produktivnostni odnosi peči, so samo en del osnove, s katero je mogoče zasledovati in dosežati ugodno proizvodnjo. Drugi del je metalurški, ki pa tu ni obravnavan.

### UVOD

Prvi zametki uporabe električne energije za taljenje rud in metalov segajo v leto 1853, ko je Francoz Pichon patentiral svojo električno peč za taljenje. Prvo praktično uporabno električno peč je zgradil Williēm Siemens 1879. leta. To je bila enofazna obločna peč s korizontalnima elektrodama, med katerima je gorel obločni plamen, pod njim pa se je nahajal talilni lonec. Tako izvedbo obločnih peči štejemo med peči z indirektnim lokom. Razen nekaj izjemnih primerov takih peči ni več v obratovanju, ker so imele preveč konstrukcijskih težav. Sodobne elektroobločne peči so peči z direktnim lokom, t. j. z lokom med elektrodo in vložkom oziroma talino. Take vrste peči je razvil Francoz Heroult v letih 1888 do 1892. Bistvena izboljšava te peči je bila v tem, da je bil električni lok v času taljenja zakrit z vložkom, da toplotna energija ni mogla direktno sevati na obzidavo peči. Današnje elektroobločne peči, ki so trifazne, imajo namesto lonca gibljivo kad, ki ima v premeru tudi

preko 5 m: kad se lahko giblje naprej ali nazaj za izliv taline in žlindre, lahko pa tudi — pri posebnih izvedbah — rotira. Kad je prekrita z obokom, skozi katerega segajo elektrode. Pri šaržiranju peči se obok dvigne in nagne toliko od kadi, da lahko košaro z vložkom izsujemo direktno v kad. Starejše izvedbe elektroobločnih peči nimajo gibljivega oboka.

Za letnico začetka industrijske proizvodnje surovega jekla iz elektro obločnih peči lahko smatramo leto 1900, ko je proizvodnja elektro jekla dosegla okrog 5000 t. Vzporedno z naraščanjem proizvodnje elektroenergije in izpopolnitvijo elektro topilniškega agregata se je razmahnila proizvodnja elektro jekla do neslutnih možnosti. V letu 1965 je bila svetovna proizvodnja elektro jekla 57.800.000 t ali 12,6 % celotne proizvodnje surovega jekla (459.000.000 ton). Če računamo, da je potrebno okroglo 1000 kWh/t električne energije za finalno proizvodnjo tega elementarnega artikla naše civilizacije, pomeni poraba 57,8 milijard kWh v letu 1965 izredno bogatega potrošnika, ki s svojimi specifičnostmi vsiljuje elektrogospodarstvu svojevrsten značaj.

Predvsem je to potrošnik, ki s svojo močjo angažira proizvajalce električne energije podnevi in ponoči, ob delavnikih in praznikih, poleti in pozimi popolnoma enako. S takim odvzemom povcenjuje električno energijo. Proizvajalci in dobavitelji električne energije dajejo zato po vsem svetu, kjer vladajo ekonomske zakonitosti, posebne ugodnosti železarnam (jalova energija se sploh ne obračunava, ugodne obojestranske posebne obveznosti itd.) Zaradi tega tudi metalurgija najde vedno znova v svoji računici primernost novih investicij za proizvodnjo jekla na osnovi elektroenergije.

Procentualni delež elektro jekla, jekla iz elektro obločnih peči (tu ni izvzeta proizvodnja jekla iz visoko frekvenčnih peči) v skupni proizvodnji surovega jekla se po posameznih deželah razlikuje, kot to kažejo podatki iz spodnje tabele.

PROIZVODNJA SUROVEGA JEKLA  
leta 1965 (v 1000 t)

	Elektro jeklo	Surovo jeklo	%
Sovjetska zveza	8.650	91.000	9,5
Združene države	12.523	122.100	10,3
Švedska	1.802	4.725	38,2
Italija	4.745	12.680	37,8
Jugoslavija	229	1.769	12,9

Podatki o naraščanju proizvodnje elektro jekla govore o vedno večjem porastu. Med leti 1952 do 1966 je celotna proizvodnja jekla v ZDA narasla za 44 %, proizvodnja elektro jekla pa je v istem obdobju porasla za 114 %. Že l. 1957 je bilo 65 % vseh ogljikovih jekel v ZDA proizvedenih v elektro obločnih pečeh. Trend naraščanja proizvodnje elektro jekla je za zadnja tri desetletja skoraj konstanten — podvojitvena doba je 10 let, kar se zelo ujema s trendom naraščanja potrošnje elektroenergije.

Paralelna rast metalurgije in električne energije torej ni slučajna. Proces skupnega stimulativnega razvoja pa je šele na začetku. Poleg ugodne cene vložka — starega železa je druga najvažnejša surovina za proizvodnjo elektro jekla električna energija. Perspektive za ceneno proizvodnjo te surovine pa so dane — predvsem na zahodu — s proizvodnjo v jedrskih elektrarnah. Že današnje jedrske elektrarne konkurirajo po svoji ceni za proizvedeno kWh termoelektarnam in celo hidroelektarnam, kljub temu da izkoristijo le 2 % energije urana. Dokaz temu so velike jedrske elektrarne v ZDA in Angliji. Danes se ceni skupna moč jedrskih elektrarn na 10.000 MW, samo v ZDA pa jih je v gradnji skupno 12.000 MW, v razdelavi pa nadaljnjih 28.000 MW. Za leto 1980 se predvideva svetovna moč jedrskih elektrarn na 300.000 MW. Pri tem pa je poudariti, da bodo bodoče elektrarne z reaktorji na hitri brider izkoriščale 75 % energije urana in bodo tako rekoč same zase ustvarjale gorivo.

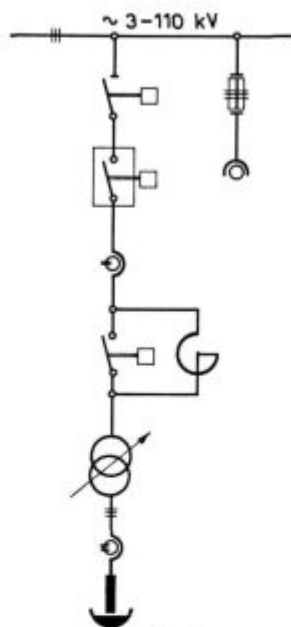
Nadaljnji pokazatelj, ki govori v prid elektro jeklu, so ugodne investicijske naložbe v tovrstno tehnologijo. Te so trikrat manjše kot investicije za proizvodnjo konvertorskega — kisikovega jekla. Ob takih razmerah ni naključje, da je danes elektro jeklo v ZDA in na Švedskem že cenejše od konvertorskega. Temu je po svoje pripomogla velika proizvodnost sodobnih topilniških agregatov, ki s pomočjo pripravljenega vložka, izredno kratke rafinacijske dobe ter velikega angažiranja električne moči v celotnem obdobju predelave že dosegajo 30 % večjo produktivnost pri porabi specifične energije pod 500 kWh/t. Tudi gradnja elektroobločnih peči je že preseгла agregate zmogljivosti 150 t ali 200 t, saj so projektirane peči 400 t.

Lahko računamo, da bo izhod iz naše jeklarske nerazvitosti, saj se nahajamo prav na dnu lestvice porabe jekla na prebivalca, terjal bistveni delež v proizvodnji jekla iz elektroobločnih peči. Vrsta jeklarn v Jugoslaviji je v izgradnji; tudi v Sloveniji se postavljajo nove elektroobločne peči. Obstaja pa že vrsta takih naprav, zato vsakodnevna praksa obratovanja in planiranja terja boljše poznavanje elektroobločnih peči kot velepotrošnika električne energije in razmer, ki jih tak potrošnik ustvarja v elektroenergetskem sistemu.

## 1. ELEKTROTEHNIČNI PARAMETRI PEČI

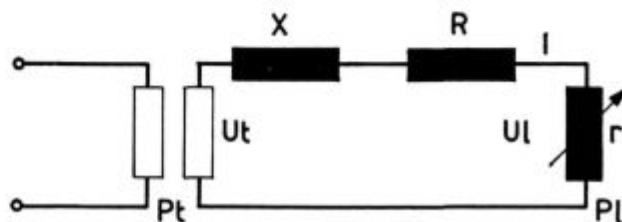
### 1.1.

Poenostavljena slika elektro obločne peči in nje ne električne opreme je razvidna iz enopolne sheme po sliki 1. V tokokrogu napajalna mreža — peč imamo poleg stikalnih, mernih, regulacijskih ele-



Slika 1  
Enopolna shema obločne peči

mentov dva elementa, ki igrata posebno vlogo pri obratovanju same peči: visokonapetostno dušilko ter transformator. Prva služi za stabilizacijo loka (električni lok ima negativno upornostno karakteristiko), transformator pa omogoča napajanje loka s tako obliko električne energije, kot jo določata velikost in konstrukcija peči oziroma obratovne razmere v peči. Medtem ko je na primarni strani transformator priključen na visokonapetostno mrežo najvišjih napetosti (3—110 kV), so njegove sekundarne napetosti v splošnem od 400 V do 60 V, tokovi pa od nekaj 1000 A do 80.000 A. Moč transformatorja se je še pred nekaj leti gibala okrog 300 kVA/t vložka, danes pa se že grade peči s specifično močjo 450—520 kVA/t vložka. Razvojna tendenca elektroobločne peči gre k vedno bolj grobemu izkoriščanju električnih naprav. Sodobni pečni transformator je regulacijski z regulacijo pod obremenitvijo.



Nadomestna shema obločne peči  
Slika 2

Gledano električno, imamo torej v tokokrogu po sl. 1 le induktivne in ohmske upornosti. Preden pristopimo k obračunu tako poenostavljenega tokokroga po sl. 2 je potrebno omeniti vrsto poenostavitve in predpostavk, katere je potrebno pri rezultatih obračuna upoštevati:

1. Predpostavljen je stacionaren proces v peči.
2. Predpostavljene so sinusne vrednosti napetosti in toka.
3. Predpostavljene so skoncentrirane in v obratovanju nespremenjene vrednosti upornosti.
4. Električni lok ima samo ohmsko upornost.
5. Upornost vložka oziroma taline je zanemarljiva.
6. Vse relacije se nanašajo na enofazne razmere. Pri računanju jih je smiselno modificirati.

V tekstu so uporabljene naslednje označbe:

- U — napetost transformatorja
- $U_l$  — napetost loka
- $U_0$  — kritična napetost
- J — tok loka
- $J_k$  — tok kratkega stika
- $J_0$  — tok pri kritični napetosti
- $J_{k0}$  — tok idealnega kratkega stika ( $R=0$ )
- $J_{Plmax}$  — tok pri maksimalni moči loka
- $J_{\eta_{max}}$  — tok pri maksimalnem izkoristku naprave
- $J_{\xi_{max}}$  — tok pri maksimalnem erozijskem indeksu
- $P_n$  — navidezna moč na transformatorju
- $P_l$  — delovna moč na loku
- $P_{max}$  — maksimalna delovna moč na transformatorju
- $P_{kon}$  — konična moč (urna ali četrturna)
- $P_{lmax}$  — maksimalna moč loka
- $P_{ko}$  — moč električnih izgub pri idealnem kratkem stiku
- $P_p$  — izgube peči zaradi sevanja in konvekcije
- $P_{pt}$  — izgube peči pri taljenju
- $P_{pv}$  — izgube pri raztaljenem vložku
- P —
- izg. el. — električne izgube (Joulova moč)
- $P_{sr}$  — povprečna moč ciklusa šarže
- R — ohmska upornost vseh v tokokrogu nastopajočih elementov razen upornosti loka
- r — ohmska upornost loka
- x — induktivna upornost vseh v tokokrogu nastopajočih elementov
- $Z_s$  — skupna impedanca tokokroga z upoštevanjem upornosti loka
- $Z_k$  — kratkostična impedanca
- $\cos \varphi$  — fazni faktor
- $\cos \varphi_k$  — fazni faktor pri kratkem stiku
- $\cos \varphi_0$  — fazni faktor pri kritični napetosti
- $\cos \varphi_{sr}$  — fazni faktor ciklusa šarže
- $(\cos \varphi)_{\eta_{max}}$  — fazni faktor pri maksimalnem izkoristku
- $(\cos \varphi)$  — fazni faktor pri maksimalni moči loka
- $(\cos \varphi)_{\xi_{max}}$  — fazni faktor pri maksimalnem erozijskem indeksu
- $\eta$  — termični izkoristek
- $\eta_{el}$  — električni izkoristek
- $\eta_e$  — električni izkoristek pri moči  $P_e$
- $\eta$  — maksimalni izkoristek
- $\eta_p$  — izkoristek pri maksimalni moči loka
- t — čas oksidacije + čas rafinacije + mrtvi časi
- $t_r$  — čas raztaljenega vložka
- $t_p$  — čas taljenja pri obratovanju z maksimalno močjo loka
- $t_{\eta}$  — čas taljenja pri obratovanju z maksimalnim izkoristkom
- $t_s$  — čas preobremenljivosti transformatorja
- G — teža vložka v peči
- g — proizvodnost peči
- $g_t$  — proizvodnost peči v času taljenja

- $g_r$  — proizvodnost peči v času raztaljenega vložka
- f — faktor obremenitve
- p — faktor preobremenjenosti
- o — faktor obremenjenosti
- l — dolžina loka med elektrodo in talino
- $\alpha$  — fiksni stroški na uro obratovanja peči
- $\beta$  — cena električne energije
- $\gamma$  — razmerje talilnih časov
- $\xi$  — erozijski indeks
- $s_0$  — teoretična specifična poraba energije za taljenje (340 kWh/t)
- w — specifična poraba energije
- $w_t$  — specifična poraba energije za taljenje
- $w_r$  — specifična poraba energije pri raztaljenem vložku
- $w_0$  — specifična poraba energije pri oksidaciji
- S — razmerje stroškov obratovanja pri maksimalni moči loka proti stroškom obratovanja pri maksimalnem izkoristku

Impedanca tokokroga je

$$Z_s = \sqrt{(R + r)^2 + X^2}$$

Tok električnega loka je

$$J = \frac{U}{Z_s}$$

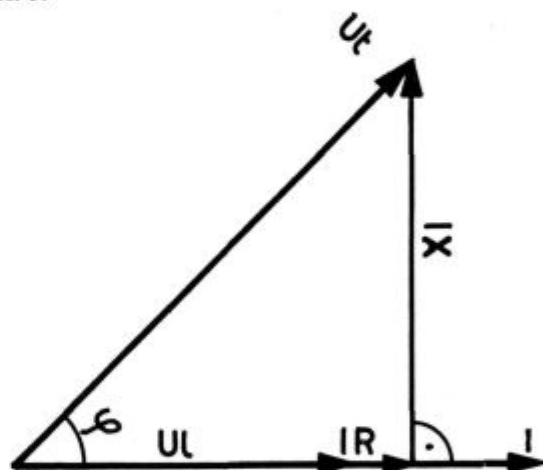
Delovna moč električnega loka je

$$P_l = \frac{r}{Z_s^2} U^2$$

Napetost loka je

$$U_l = \sqrt{U^2 - J^2 X^2} - JR$$

Iz slednje enačbe dobimo kazalčni diagram po sl. 3.



Slika 3  
Kazalčni diagram obločne peči

Kot med napetostjo in tokom dobimo po enačbi

$$\cos \varphi = \frac{R + r}{Z_s}$$

Tok kratkega stika — kratek stik elektrode z vložkom — dobimo po relaciji

$$J_k = \frac{U}{Z_k}$$

Ustrezni kot med napetostjo in tokom je

$$\cos \varphi_k = \frac{R}{Z_k}$$

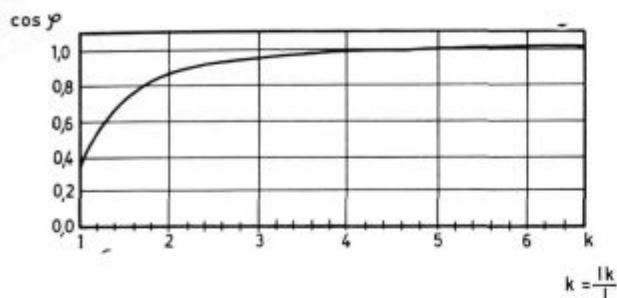


Idealen tok kratkega stika dobimo, če zanemarimo ohmske upornosti tokokroga

$$J_{ko} = \frac{U}{X}$$

Če zanemarimo  $R^2$  v primerjavi z  $X^2$  ( $R \ll X$ ) lahko iz zgornjih enačb izpeljemo naslednjo relacijo

$$\cos \varphi = \sqrt{1 - \left(\frac{J}{J_k}\right)^2}$$



Slika 4  
Fazni faktor obločne peči

Enačbo prikazuje sl. 4, iz katere lahko že sklepamo na osnovne značilnosti elektro obločne peči kot potrošnika električne energije. Z dobrim  $\cos \varphi$  lahko obratujemo le takrat, če dopuščamo velike kratkostične tokove oz. če zmoremo zmanjšati induktivne upornosti na takšen nivo. Taka želja ima postavljene dvojne meje: prvič zahteva konstrukcija peči določeno dolžino in razporeditev visokotokovnih dovodov na peč. S tem je pa že podana njih induktivnost, ki tudi predstavlja pretežni del induktivnosti celotne naprave. Po drugi strani pomenijo večji kratkostični tokovi večje spremembe napetosti v napajalni mreži. Iz dolgoletnih izkušenj graditeljev elektroobločnih peči je bilo dobljeno

grobo pravilo, po katerem mora biti skupna impedanca naprave vsaj tolikšna, da so kratkostični tokovi enaki dvakratnim nazivnim tokovom.

Izredne važnosti za metalurški proces v peči kakor tudi za elektrogospodarstvo je moč, ki je angažirana pod električnim lokom. Maksimalno moč lahko dobimo iz pogoja

$$\frac{\sigma P_1}{\sigma r} = \emptyset$$

Pri tem pogoju mora upornost loka ustrezati zahtevi

$$r = Z_k$$

Maksimalna moč loka je

$$P_{lmax} = \frac{U^2}{2(R + Z_k)}$$

Maksimalna moč loka nastopa pri toku:

$$J_{Plmax} = \frac{U}{\sqrt{2Z_k(R + Z_k)}}$$

Fazni faktor, pri katerem ta moč nastopa:

$$(\cos \varphi)_{Plmax} = \sqrt{1 - \frac{X^2}{2Z_k(R + Z_k)}}$$

Maksimalna delovna moč na transformatorju:

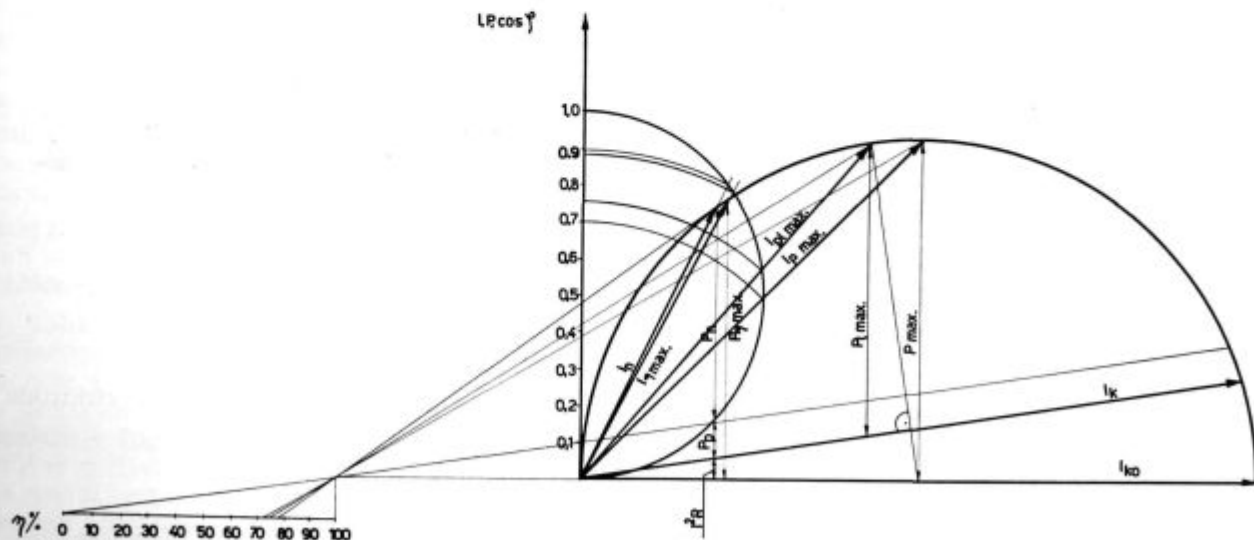
$$P_{max} = \frac{U^2}{2X}$$

Tok, pri katerem nastopa ta moč

$$J_{Pmax} = \frac{J_{ko}}{\sqrt{2}}$$

Fazni faktor pri maksimalni delovni moči na transformatorju:

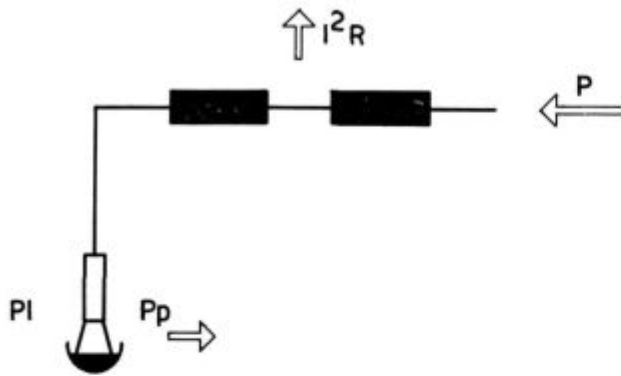
$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$$



Slika 5  
Krožni diagram obločne peči

Na podlagi dosedanjih enačb se da narediti krožni diagram po sl. 5.

Dosedaj smo pri obračunavanju tokokroga po sl. 2. obravnavali le splošne električne veličine. Manjka še obračun energetske plati elektroobločne peči, ki naj upošteva bilanco koristnih in izgubljenih energij. Po poenostavljeni energetske situaciji



Slika 6  
Energetske razmere obločne peči

sl. 6 bomo ločili od dovedene energije koristno in izgubljeno, kot je to običajno pri strojih. Imamo dovedeno moč, ki je enaka moči loka + izgube na dovodu k peči, ter koristno moč, ki je enaka razliki med močjo loka in izgubami peči ( $P_p$ ) zaradi konvekcije in sevanja.

Izraz za izkoristek naprave sledi

$$\eta = \frac{P_1 - P_p}{P_1 + J^2 R}$$

Odrpto vprašanje maksimalnega termičnega izkoristka naprave je rešljivo pri pogoju, da je

$$\frac{\sigma \eta}{\sigma J} = \emptyset$$

Preko prej navedenih relacij se dobi enačba, po kateri dobimo tok, pri katerem je izkoristek naprave maksimalen:

$$J\eta_{\max} = \frac{U}{\sqrt{2X^2 + U^2 \frac{R}{P_p}}}$$

Pripadajoči fazni faktor:

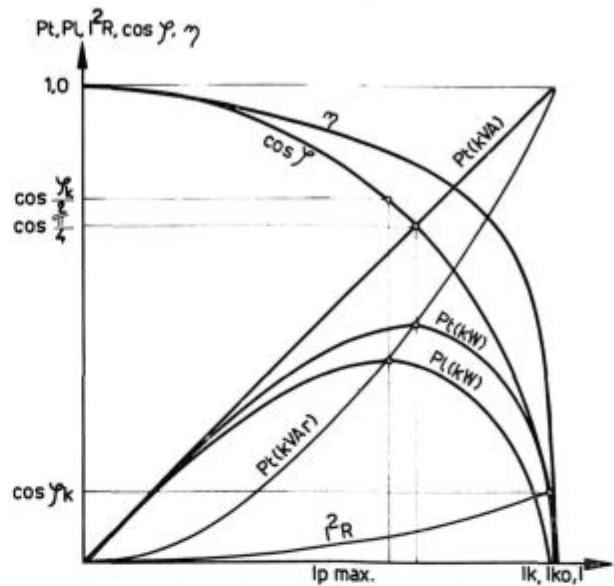
$$(\cos \varphi)_{\max} = \sqrt{1 - \frac{1}{2 + P_{ko}/P_p}}$$

pri čemer je

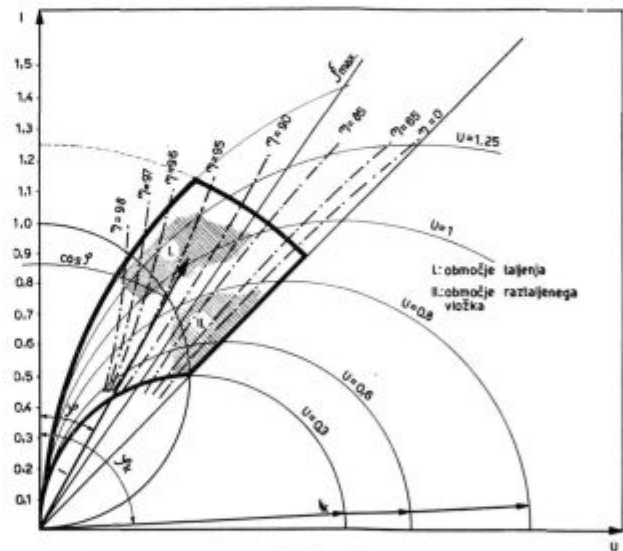
$$P_{ko} = J_{ko}^2 R$$

Ce si ogledamo na sl. 7. oz. na sl. 8. prikazane obratovalne diagrame za obločno peč, vidimo, da lahko obratujemo na katerem koli mestu, upoštevajoč pri tem napetostni razpon, ki ga določa regu-

lacija transformatorja ter tokovne obremenitve, ki so odvisne poleg transformatorja še od elektrodne regulacije. Kljub temu se obratovalne možnosti elektro obločne peči kot velepotrošnika električne



Slika 7  
Obratovalni diagram obločne peči



Slika 8  
Razširjeni krožni diagram obločne peči

energije gibljejo v mnogo ožjih mejah, kot to izhaja iz dosedanjih ugotovitev. Predvsem ne smemo pozabiti na tehnološki proces v peči, ki zahteva v začetnem obdobju, t. j. za časa taljenja vložka ekstremno angažiranje električne moči na loku, v kasnejšem obdobju raztaljenega vložka pa zahteva tehnologija »vožnjo« po določenem temperaturnem režimu. Angažiranje moči je tu mnogo manjše.

Ce se zaenkrat omejimo zgolj na obratovalni režim v času taljenja, smo takoj pri vprašanju najgospodarnejšega obratovanja: ali je ta pri obrato-

vanju z maksimalnim izkoristkom ali pa pri obratovanju z maksimalno močjo loka ali pa je obratovalna točka najgospodarnejšega obratovanja druge.

Če si pogledamo razmerje obratovalnih stroškov, ki enkrat nastopajo pri obratovanju z maksimalno močjo loka, drugič pa pri obratovanju z maksimalnim izkoristkom, dobimo, da je odnos stroškov odvisen:

$$S = \gamma \cdot \frac{1 + \frac{\beta}{\alpha (1 - \eta_p) \cdot P_{lmax}}}{1 + \frac{\beta}{\alpha (1 - \eta_\eta) P_{\eta max}}}$$

Pri čemer je  $\gamma$  razmerje časov taljenja

$$\gamma = \frac{t_p}{t_\eta} = \frac{P_{\eta max} \cdot \eta_\eta}{P_{lmax} \cdot \eta_p}$$

Raziskave po zgornjih relacijah kažejo, da je obratovanje z maksimalnim izkoristkom (t. j. z minimalno specifično porabo energije) gospodarnejše le pri obločnih pečeh z velikimi toplotnimi izgubami (relativne izgube preko 0,25). Posebno pri večjih agregatih profit na specifični porabi energije v primeru obratovanja v točki maksimalnih izkoristkov ne odtehta dobiti na skrajšanju časa taljenja v primeru obratovanja z maksimalno močjo na loku. Slednje obratovanje zahteva le 70 % do 80 % talilnega časa, ki je potreben za obratovanje z maksimalnim izkoristkom. Upoštevati moramo tudi razmerje cen: dokler je električna energija relativno poceni, kapitalni stroški elektroobločne peči inkluzive kapitalni stroški pripadajočih metalurških naprav pa visoki, je izkoriščanje agregata pri maksimalni moči loka gospodarnejše.

Literatura navaja, da obratujejo sodobni veleagregati s faznim faktorjem za časa taljenja nekje med 0,72—0,78. Če to primerjamo s prej navedeno relacijo za fazni faktor, dobimo takoj potrditev za zgornja izvajanja (Primer 25 t obločne peči:  $Z_k = 45\%$   $R = 6,5\%$  ( $\cos \varphi$ )  $P_{lmax} = 0,76$ .

Postavlja se vprašanje, ali je obratovanje z maksimalno močjo loka sploh dosegljivo. Kot je razvidno iz enačbe za velikost te moči, je ta sorazmerna kvadratu napetosti transformatorja in obratno sorazmerna z impedanco naprave. Čim manjša je torej induktivna upornost, ker le ta je odločujoča, tem večja je maksimalna moč loka. Pri dovolj nizkih upornostih dobimo moči, ki so mnogo nad nazivno močjo transformatorja. To velja predvsem za manjše obločne peči, kjer so napetosti relativno visoke (do 400 V). Pri velikih agregatih — nad 60 t, katerih lastna induktivna upornost je že precejšnja, je problem obrnjen: obstaja nevarnost, da bi transformatorjeva nazivna moč bila večja od maksimalne moči pod lokom. Vedeti namreč moramo, da smo z napetostmi na (sekundarju) transformatorja omejeni: 500 V je že

izredna napetost; kljub temu so Japonci l. 1962 postavili 200 t elektroobločno peč z napetostjo 700 V.

Ker induktivne upornosti z velikostjo rastejo več kot linearno, je jasno, da postane dušilka pri določeni velikosti naprave naenkrat odveč. Ta meja je nekje pri pečeh kapacitet 30—50 t oziroma pri pečnem transformatorju moč okrog 10.000 kVA. Seveda je meja odvisna od izvedbe peči in končno od napajalne mreže.

Postavlja se problem, kako pri velikih agregatih znižati odvečne induktivne upornosti. Konstrukterji peči dosegajo to s posebnimi transformatorji z majhno kratkostično napetostjo, s čim krajšo povezavo med transformatorjem in pečjo, s posebno razporeditvijo nizkonapetostnih vodnikov, s tem da priključujejo pečne transformatorje na najvišje napetosti (110 kV, 150 kV). Zanimiva je tako imenovana Knappsackova vezava nizkonapetostnih vodnikov, po kateri je sekundarna stran pečnega transformatorja odprt trikotnik, ki je sklenjen šele pri elektrodah na peči.

Izračuni kažejo, da so potrebne naslednje tokovne preobremenitve transformatorja v času taljenja, da bi se dosegla točka maksimalne moči na električnem loku:

- pri 50 % kratkostični impedanci ca 30 %
- pri 45 % kratkostični impedanci ca 45 %
- pri 40 % kratkostični impedanci ca 60 %.

Ali pečni transformator take preobremenitve lahko prenese? Ti transformatorji so običajno zelo dobro grajeni in dimenzionirani. Enotnih predpisov tu ni. Kot primer navajamo zahteve sovjetskih graditeljev peči za preobremenljivosti pečnih transformatorjev.

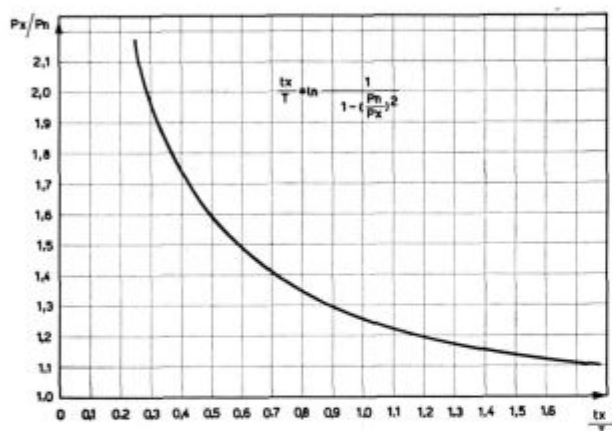
	Predhodni trajni prazni tek	Predhodna trajna 100 % obremenitev
preobremenitev 250 %	10 sek.	./.
preobremenitev 100 %	30 min.	5 min.
preobremenitev 50 %	60 min.	30 min.
preobremenitev 25 %	240 min.	120 min.

Sodobni transformatorji prenesejo izredne preobremenitve. Za racionalno izkoriščanje naprave je poznavanje preobremenljivosti zelo važno. Pravilno izkoriščanje te možnosti pa je možno samo ob pravilni transformatorjevi zaščiti. O tem je govor na drugem mestu, pripomniti je samo, da je najmerodajnejše merilo preobremenljivosti celotne naprave temperatura delov, ki vodijo tok (navitja transformatorja in dušilke, zbiralnice, dovodi na peč, elektrodna držala in elektrode).

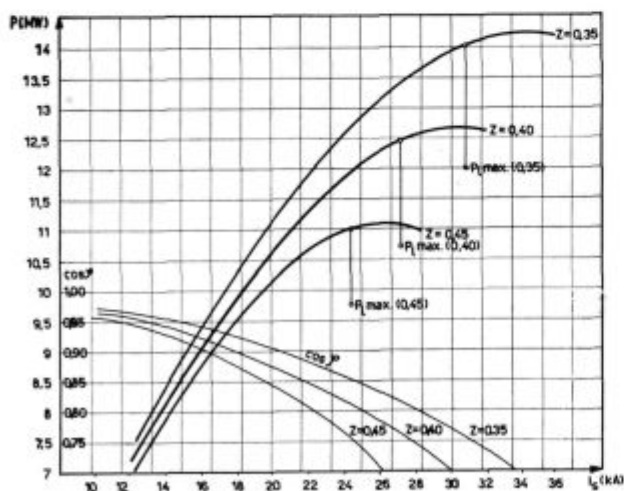
O preobremenljivosti transformatorja nam lahko mnogo pove njegova časovna konstanta segrevanja: obe vrednosti sta si sorazmerni. Idealizirane razmere preobremenljivosti, če je pred njo in za njo trajni prazni tek — nam kaže relacija

$$\frac{t_x}{T} = \ln \frac{1}{1 - \left(\frac{P_n}{P_x}\right)^2}$$

pri čemer je  $T$  časovna konstanta transformatorja,  $t_x$  pa čas dopustne preobremenitve moči  $P_x$ . Iz enačbe sledi, da je 25 % preobremenitev dopustna za čas, ki je enak časovni konstanti segrevanja. Ker imamo ob obločnih pečeh transformatorje velikih moči, ki imajo visoke časovne konstante, obremenitve transformatorja pa lahko smatramo kot obremenitve z določeno intermitenco, so ti transformatorji že po naravi obratovanja preobremenljivi. Možnosti preobremenljivosti transformatorjev pri idealnih razmerah kaže slika 9.



Slika 9  
Preobremenljivost pečnega transformatorja

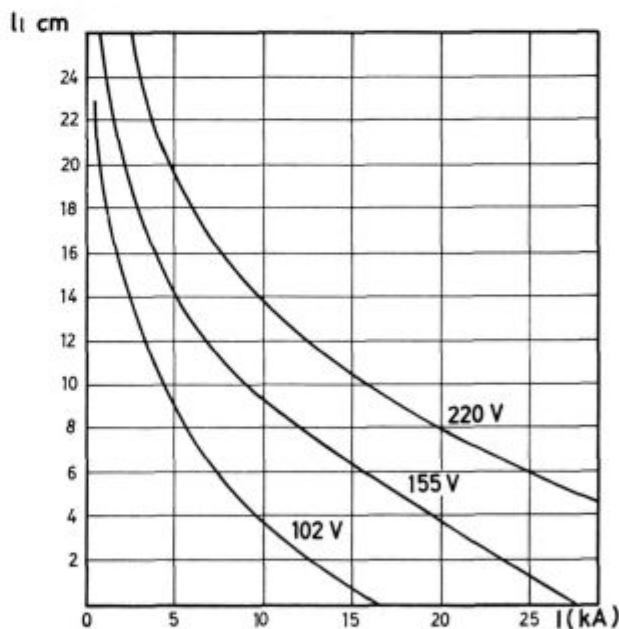


Slika 10  
Tokovi maksimalnih moči in maksimalnih izkoristkov

Dobro izbrana elektro oprema peči omogoča takšne preobremenitve, da je območje maksimalne moči na loku dosegljivo. Pri tem je potrebno dušilko, ki je v času taljenja vklopljena, primerno uglasiti impedancam peči, transformatorja in kratkostičnim močem napajalne mreže. Iz prakse, pa tudi iz literature dobljeni podatki govore o 120 % poprečni obtežbi v času taljenja. Upoštevajoč prekinitev taljenja se dejanske preobremenitve približujejo resnično optimalnim. Razmere ob tokovih maksimalne moči na loku oziroma ob tokovih maksimalnega izkoristka nam kaže slika 10.

## 1.2.

Obratovanje elektro obločne peči v času oksidacije in rafinacije se elektroenergetsko bistveno razlikuje od obratovanja peči v času taljenja. Medtem ko je bila angažirana moč v času taljenja praktično omejena edino z zmožnostjo električnih naprav, je za obdobje raztaljenega vložka značilen manjši in enakomernjši odvzem energije, odvisen v glavnem le od pretežnosti endotermnih oz. eksotermnih reakcij v kopeli, od višine zahtevane temperature taline ter od toplotnih izgub peči. Energija se mora v tem času dovajati pri manjši napetosti loka. Pri manjši napetosti imamo krajši lok, pri tem pa je toplotno sevanje na obok manjše, kar je odločilne važnosti za vzdržnost obzidave.



Slika 11  
Dolžina električnega loka

Kot prikazuje sl. 11 za konkreten primer, je napetost, tok ter dolžina loka v skladu s poenostavljeno Ayrtonovo enačbo:

$$U_l = A + B \cdot \frac{1}{J}$$

Pri čemer so  $A$  in  $B$  konstante.



Moč dovedene energije v peč je torej v glavnem velikost moči toplotnih izgub (posebno v času rafinacije). Zaradi dobrih jonizacijskih pogojev je lok stabilen, zato je ta čas dušilka izklopljena.

Če obračunamo idealno energetska situacijo v tem obdobju, pri kateri predpostavimo enakost dovedene ter odvedene energije, dobimo tako imenovano kritično napetost transformatorja, to je najmanjšo napetost, pri kateri lahko dovedemo v peč enako moč, kot jo predstavljajo skupne izgube:

$$U_o = \sqrt{2P_p (R + Z_k)}$$

Ustrezni tok je

$$J_o = \sqrt{\frac{P_p}{Z_k}}$$

Ustrezni fazni faktor

$$\cos \varphi_o = \sqrt{1 - \frac{X^2}{2Z_k (R + Z_k)}}$$

Kot je razvidno iz teorije, sovpadata v primeru, da je moč loka enaka moči toplotnih izgub ( $P_t = P_p$ ), obratovalni točki maksimalne moči na loku in maksimalnega izkoristka. To potrjuje tudi relacija za fazni faktor, ki je identična prej navedeni relaciji za fazni faktor pri maksimalni moči loka. To je območje nizkih izkoristkov, teoretično izkoristkov nič.

Obratovalna mesta v času oksidacije in rafinacije se torej nahajajo v območju okrog kritične napetosti oziroma okrog pripadajočega toka, pri katerem je fazni faktor 0,74—0,72. Za doseganje takega obratovanja ni nobenih zaprek. Daleč pa tako obratovanje ne bi bilo najugodnejše, če ne bi istočasno izpolnjevalo drugih pogojev. Pri določanju najugodnejših obratovalnih mest v času taljenja — okrog maksimalne moči na loku — ni drugih tehnoloških zadržkov, razen da naj se taljenje vrši pri zakritem loku (Verdeckte Lichtbogen). Tako obratovanje pa ni več možno, kakor hitro imamo raztaljen vložek. Zdaj energija loka prosto seva v prostor peči. 85 % do 90 % celotne oddane energije seva sam električni lok, ki ima temperaturo do 8000° K, preostalih 10 % do 15 % pa oddaja izstopna površina loka na elektrodi. Dimenzije električnega toka so odvisne od mnogih faktorjev. Red velikosti za premer električnega loka v obločnih pečeh dosega vrednosti par centimetrov, dolžina pa se giblje okrog 10 cm. Pri takih relativno majhnih dimenzijah loka pa so njegove površinske obremenitve izredne: več 100 kW/cm<sup>2</sup>, kar je n. pr. več kot desetkrat več kot pri plamenskem varjenju.

Iz treh krožno razmeščenih lokov trifazne elektroobločne peči sledi razporeditev toplotne obremenitve na površino taline oz. na ostalo okolico. Iz toplotno geometrijskih odnosov sledi, da pride

ca 90 % energije, ki seva na talino v krog premera dvojne razdalje talina — elektroda. To so tako imenovane vroče cone pod elektrodami. Delilni krog elektrod mora biti tak, da se te cone delno prekrivajo in da se v centru peči ustvarja enotno območje velikih toplotnih obremenitev.

Glede na sevalni koeficient žilindre, ki prekriva jekleno talino in ki se giblje v času oksidacije okrog 0,60 in v času rafinacije okrog 0,50 vidimo, da kopel absorbira le 50 % do 60 % energije, ki jo na kopel seva lok. Preostali del se reflektira na notranjo obzidavo peči, predvsem na njen obok. Idealiziran izračun kaže, da sprejme obzidava peči 67 % do 72 % energije, talina pa 30 do 28 % energije. Prve številke veljajo za oksidacijo, druge pa za rafinacijo.

Pri izračunu so bili seveda zanemarjeni efekti zasenčenja in temperaturna razlika med kopeljo in obzidavo, ki zgornjo sliko lahko bistveno spremenijo. Pri sprejemu energije na kopel igra važno vlogo žilindra. Bistven vpliv ima njen absorpcijski koeficient in njena specifična toplotna prevodnost, ki lahko v času kuhanja niha v razmerju 1 : 14. Debelina žilindre neugodno vpliva na temperaturno razdelitev v peči, zato so zahteve pri velikih pečeh, kjer debelina žilindre raste s tretjim korenom iz zmogljivosti peči, po najugodnejšem obratovanju ostrejše.

Pri realnejšem obravnavanju sevalne energije loka po prostoru peči seveda ne moremo mimo efekta zasenčenja: čim krajši je lok, tem bolj elektroda zasenči obok. Pri kratkem loku se ta tudi premakne pod samo elektrodo, medtem ko je pri veliki razdalji elektroda — kopel izvor lok zunanja stena ali rob elektrode in je ta celo nagnjena na svojem spodnjem koncu navzven, kar je zelo neugodno. S skrajšanjem loka dobimo dejansko dvojen efekt: večje zasenčenje loka in ugodnejše razmerje sevanja na talino in obzidavo. Skrajšanje loka pa pomeni manjšo napetost na loku oz. večji tok loka.

Iz podobnih razglabljanj je ameriški raziskovalec elektro obločnih peči Mr. Schwabe vpeljal tako imenovani erozijski indeks kot nekakšno merilo za obremenitev obzidave peči pri obratovanju peči z raztaljenim vložkom. Izhajal je iz dejstva, da je obremenitev obzidave peči sorazmerna z močjo loka in sorazmerna tudi z napetostjo loka. Erozijski indeks je zato enak:

$$\xi = k \cdot U_l \cdot P_l$$

Mr. Schwabe ga je računal številčno in ugotovil, da ima indeks svoj maksimum pri ca 2/3 maksimalne moči na transformatorju. Za vsakdanjo prakso pa se da erozijski indeks (t. j. najneugodnejše obratovanje) prikazati bolj ugodno. Avtorjeva originalna pot je naslednja:

$$\xi = k \cdot U_l \cdot P_l = k (JU^2 - J^3 X^2)$$

Maksimalni erozijski indeks nastopa torej vedno ob istem faznem faktorju 0,82!

Ce ob zaključku obravnave obratovalnih območij elektroobločne peči pri raztaljenem vložku pogledamo najprimernejša območja, vidimo, da bo v času oksidacije in segrevanja kopeli na višje temperature ugodno obratovati z močjo, ki bo nižja od maksimalne moči loka, t. j. v okolici moči pri maksimalnem izkoristku (ob primarno znižani napetosti brez vklopljene dušilke). Pripadajoči fazni faktor lahko pričakujemo okrog 0,85. Pri rafinaciji, ko praktično krijemo le toplotne izgube peči, je najugodnejše obratovati v območju maksimalnih moči loka ob najnižjih napetostih. Pripadajoči fazni faktor se ne bo dvignil nad 0,75. V obeh primerih se je nujno izogibati obratovanja s faznim faktorjem 0,82. (Glej sliko 8.)

Maksimum nastopa pri pogoju

$$\frac{\sigma \xi}{\tau J} = \emptyset$$

Iz česar se dobi tok, pri katerem je indeks maksimalen

$$J_{\xi_{\max}} = \frac{U}{\sqrt{3X}}$$

Pripadajoči fazni faktor se dobi preko:

$$\sin \varphi_{\xi} = \frac{1}{\sqrt{3}}$$

$$\cos \varphi_{\xi} = 0,82$$

## PEČ KOT ELEKTROENERGETSKI POTROŠNIK

### 2.1

Podrobnejša analiza karakteristik elektroobločne peči kot potrošnika električne energije ne more iti preko fizikalnih dogajanj na loku v posameznih obdobjih obratovanja peči. Posebni pogoji gorenja loka v teh obdobjih zahtevajo izpolnitev različnih zahtev elektrodne regulacije. Tako imenovana elektrodna regulacija predstavlja dejansko regulacijo moči na loku. V splošnem se da moč loka pri znani napetosti definirati z njegovo impedanco. Določena impedanca loka pa je podana z geometrijo razmer na loku, predvsem z njegovo dolžino. Merni člen elektrodne regulacije je torej kvocientni impedančni merilec, izvršni člen regulacije pa skrbi za ustrezne premike elektrod v nove položaje v odvisnosti od spremenjene impedance loka (glej sl. 12).

Praden si bomo podrobneje ogledali detajle same regulacije, si poglejmo najprej njene naloge:

a) **Začetek taljenja:** ob priključitvi peči na mrežo oziroma ob priklopitvi avtomatike, se morajo elektrode avtomatično spustiti na vložek, ob njihovem direktnem kontaktu z njimi se vžge lok, elektroda pa se mora odmakniti na razdaljo, ki jo

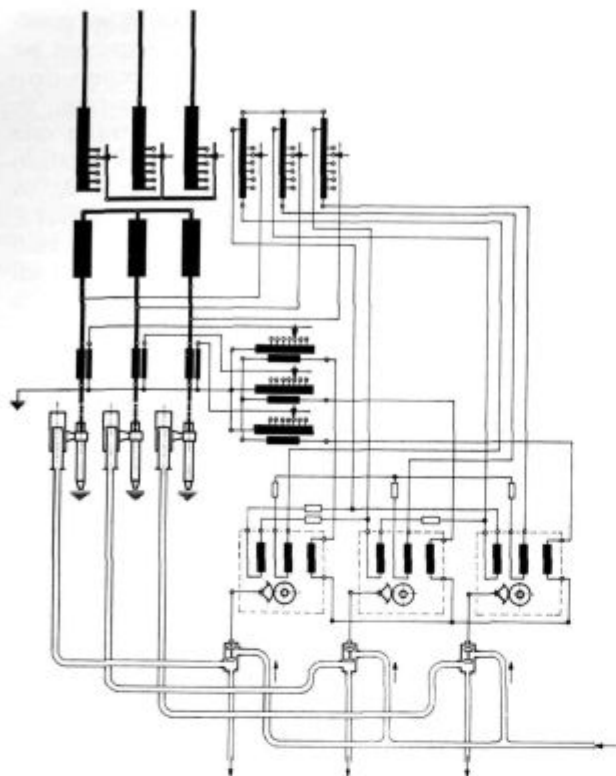
zahteva nastavitev regulacije. Trenutek vžiga predstavlja za transformator kratek stik: napetost na elektrodi pade na vrednost nič; ali povedano drugače: ničlišče, ki pri obločni peči ni fiksirano, se premakne v ogljišče napetostnega trikotnika one faze, ki je v kratkem stiku. Pogost pojav kratkih stikov v začetku taljenja je bil tudi vzrok, da so prvotno regulacijo, ki je bazirala na merjenju toka, zamenjali z impedančno regulacijo. Pri kratkem stiku ene faze se namreč spremenijo tokovi tudi v drugih dveh fazah. Taka tokovna regulacija je bila mnogo bolj nemirna kot impedančna. Impedanca faze, ki je v kratkem stiku, se spremeni, impedanca zdravih faz pa ostane pri tem praktično ista. Praktično zaradi tega, ker se impedanca loka s spremembo toka tudi delno spremeni. Ob kratkem stiku ene faze dobimo tako vseeno spremembo moči na drugih fazah, vendar so ti vplivi močno oslabljeni.

Ob začetku taljenja je regulacija pred težko nalogo, ker mora čase trajanja kratkih stikov zmanjšati na najmanjšo mero. Skrbeti mora, da se lok ne pretrga, ker so pogoji za obstoj loka v hladni peči zelo neugodni. Kratki stiki in trganje loka ima za posledico izredno nihanje angažirane moči, ki lahko doseže več 10 MVA/sek. Tem nihanjem težko sledijo turbinski in generatorski regulatorji napajalne mreže, kar ima za posledico veliko nihanje napetosti v bližnji okolici napajalne točke. Vzdrževanje električnega loka v začetku taljenja je zelo težavno zaradi slabih jonizacijskih pogojev; težave še poveča trifazni sistem elektrod, ki skupno z magnetnim poljem vložka teži za tem, da se loki pod elektrodami potrgajo.

Bistven za regulacijo v tem obdobju je njen nastavitveni čas. Čim krajši je, tem prej so vsa odstopanja izravnana. Previdnost pa terja izbira regulacijske hitrosti: ta v tem obdobju ne bi smela biti prevelika, ker smo sicer zaradi kratkega loka v nevarnosti, da regulacija sama povzroča kratke stike.

b) **Proces taljenja:** s časom se elektrode prebijejo skozi vložek in si v območju najtoplejših con naredo prave kraterje. Vedno obstaja možnost, da se tak krater zruši in zasuje elektrodo, kar ima za posledico kratek stik. Elektroda mora prepotovati velike razdalje (tudi nad 1 m), da se izvleče iz vložka, zato je važno, da so regulacijske hitrosti zelo velike. Vendar so zahteve po velikih regulacijskih hitrostih povezane z nizom problemov: vprašanje moči in odzivnih časov izvršnih organov regulacije, vprašanje togosti oz. resonance elektrodnih držal, vprašanje lomljenja grafitnih elektrod itd. Snodaj navedeni podatki za regulacijske hitrosti, ki so v Evropi običajne, kažejo, da zahteve po kvalitetni regulaciji rastejo z velikostjo peči:

kapaciteta peči	hitrost: mm/sek
1—4 t	25— 30
5—30 t	35— 60
nad 30 t	60—100
max.	150



Slika 12  
Regulacija moči obločne peči

Na neenakomernost odvzema energije v času taljenja pa ne vpliva samo regulacija. Obratovanje peči je v veliki meri odvisno od kvalitete vložka. Najboljši vložek imamo takrat, ko je med večje kose pomešan drobiž. Najslabša je nepaketirana pločevina, skozi katero elektroda sunkovito pregreva: naenkrat je med elektrodo in vložkom kratek stik, v naslednjem trenutku pa se lok že pretrga. Takšen neenakomeren odvzem električne energije pri slabem vložku ima za posledico tudi povečanje specifične porabe energije za preko 10 %.

Obdobje taljenja predstavlja izredno obremenitev za transformator. Ne samo zaradi velike obtežbe, temveč tudi zaradi pogostih kratkih stikov. Za dobro obratovanje v času taljenja je potreben preobremenljiv transformator, ki mora brez težav prenesti vrsto kratkih stikov. Pogoste prekinitve taljenja lahko povzročajo slaba zaščita transformatorja, ki po nepotrebnem izklaplja transformator. Taki izklopi so zelo neželeni, ker ne predstavljajo samo podaljšanje taljenja, temveč obremenjujejo tudi visokonapetostna močnostna stikala, ki so sicer pojačane izvedbe zaradi pogostih vklopov in izklopov (4—10 manevrov na šaržo). Najvažnejša zaščita transformatorja je vsekakor zaščita pred previsoko temperaturo navitja. Zaradi forsiranega hlajenja in hitrih sprememb obremenitev nam temperatura transformatorjevega olja da slabo sliko o temperaturi navitja. Če želimo preobremenljivost transformatorja popolnoma izkoristiti,

je potrebno meriti temperaturo navitja. Najobičajnejše dosežemo to s temperaturno preslikavo.

Tako imamo v oblasti ne samo preobremenitve zaradi forsiranega taljenja, temveč tudi preobremenitve zaradi kratkih stikov. Kot smo že ugotovili, se gibljejo kratki stiki elektrod z vložkom v območju  $2 J_n$  (pri vklopljeni dušilki), zato ni nujno, da bi pretokovna zaščita reagirala takoj na vsak tak kratek stik. Kot so pokazale izkušnje, se najbolj obnese dvojna pretokovna zaščita: pretokovna zaščita s časovno zakasnitvijo ter trenutna pretokovna — kratkostična zaščita. Naloga prve je, da štiti predvsem pečni del: med vložek zatak-njena elektroda, okvara elektrodnih držal ali regulacije itd. Naloga druge pa je zaščita transformatorja in dušilke ter druge visokonapetostne opreme pred notranjimi okvarami. Pretokovna zaščita s časovno zakasnitvijo običajno torej ne odklaplja pri prehodnih kratkih stikih, zato jo nastavimo nekako med  $1,4—1,8 J_n$  z veliko zakasnitvijo 10—20 sek. Ti neobičajno dolgi izklopilni časi, ki so lahko tokovno odvisni ali tudi neodvisni, omogočajo z dobro temperaturno zaščito popolnoma varno obratovanje, pri tem pa dopuščamo regulaciji, da sama odpravi pretežni del nenormalnih situacij v peči.

c) **Proces ob tekočem vložku:** nad raztaljenim vložkom gori električni lok zelo mirno. Napetosti loka so majhne, tokovi veliki, zaradi visokih temperatur je jonizacija lahka. Tudi lok sam je zelo kratek: 10—40 mm, zato pomeni vsaka sprememba te razdalje bistveno spremembo angažirane moči. Iz tega lahko torej zaključimo, da je v tem obdobju za regulacijo važna predvsem njena točnost in preciznost.

Danes poznamo dve vrsti elektrodnih regulacij pri obločnih pečeh: čiste električne regulacije in elektrohidravlične regulacije. Kot lahko sklepamo že iz samih nazivov, se obe regulaciji ločita predvsem v ojačitvenih in nastavitvenih organih.

Električna regulacija ima električna pojačala (amplidin, rototrol, transduktor) in elektromotor kot nastavitveni člen. Pri elektrohidravlični regulaciji pa so ojačala in nastavitveni členi hidravlični elementi. Pri čisti električni regulaciji je šel razvoj od prvotne regulacije s stikali (Tirrillov regulator) preko regulacije z rotacijskimi stroji na prečno polje do transduktorske regulacije oziroma do regulacije s krmiljenimi Hg ali Si usmerniki. Vendar električna regulacija ni dosegla niti s pomočjo zadnjih dosežkov elektrotehnike vseh kvalitet hidravlike. Električna regulacija ima predvsem slabosti v svoji preveliki vztrajnosti, zaradi katere so pospeški v primeru s hidravliko majhni. Kljub uporabi posebnih pogonskih motorjev z vitkimi rotorji so pospeški hidravlike tudi do 40-krat večji, tako da smo včasih že prisiljeni v hidravlični tokokrog vgrajevati dušilne elemente, da zaradi prevelikih pospeškov ne bi prišlo do loma elektrod. Odzivi celotne regulacije so seveda temu primerni: pri elektromotorni regulaciji dosežemo največ



100 ms, pri hidravlični pa je odzivni čas do 40 ms. Tudi regulacijske hitrosti elektromotorne regulacije so omejene. Danes so najvišje praktično dosežene hitrosti 50—60 mm/sek., s hidravliko pa lahko dosežemo tudi do 150 mm/sek. Če še pogledamo lastne čase ojačevalnih elementov obeh regulacij, vidimo, da so lastni časi hidravlike nekaj ms, medtem ko ima amplidin ali transduktor vsaj 10-kratne lastne čase.

Kvalitetna elektrodna regulacija bistveno vpliva na enakomernost odvzema energije, pripomore pa tudi k zmanjšanju specifične porabe energije, elektrod in ognjevzdržne opeke.

Pri običajnih izvedbah električnih peči je še ena značilnost peči kot potrošnika električne energije, ki je izven dosega regulacije t.j. asimetričnost faznih obremenitev. Asimetrija obremenitev, ki je lahko tudi do 10 %, se javlja v tako imenovani ostri fazi, t.j. v fazi one elektrode, ki je najbližja transformatorju. Ta faza ima najmanjšo dolžino dovodov na peč oz. najmanjšo impedanco, zato je napetost loka te faze vedno nekoliko višja. Na tem mestu je ognjevzdržna obloga najbolj obremenjena in njena slaba vzdržnost na tem mestu je znak, da so faze nesimetrično obremenjene.

Simetriranje elektroobločne peči se dosega na različne načine: z nesimetrično dimenzioniranimi dovodi na peč, z vgraditvijo posebne dušilke v dovod ostre faze, s trikotno vezavo na peči (odprti trikotnik na transformatorju), s tem da namesto trifaznega transformatorja vzamemo tri enofazne ali pa posebni petstebrni transformator itd.

Obnesla se je izvedba z običajnim trifaznim transformatorjem, ki ima tri regulacijska stikala.

S takimi pogoji je uspelo zmanjšati asimetrijo faznih obtežb do 2 %.

## 2.2

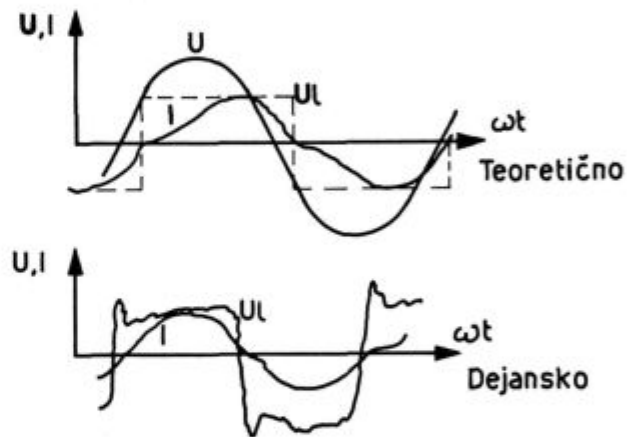
Nemirnost obratovanja elektro obločne peči, ki je izražena z neenakomernostjo odvzema električne energije, določa predvsem stabilnost električnega loka med elektrodo in vložkom. Ločimo makrostabilnost in mikrostabilnost loka. Makrostabilnost se pojavlja predvsem v času taljenja vložka. Sunkovita potrošnja energije, ki je prvih 10—15 min. še nekako periodična — regulacija vžiga lok — je kasneje popolnoma aperiodična. Vžiganje loka se vrši z nekaj zmanjšano napetostjo na elektrodah, ker imamo v tem času največ kratkih stikov. Taljenje poteka pri največji napetosti na elektrodah, s stopnjo raztaljenosti se proces umirja. Pri tem velikost vklopljene dušilke ugodno vpliva na makrostabilnost obratovanja, vendar se v proizvodnji teži k zmanjšanju induktivnosti dušilke, katere velikost zmanjšuje možnost angažiranja čim večje delovne moči na loku.

V času taljenja je velikost sunkov pri manjših napravah večja od nazivne moči transformatorja, pri večjih napravah (nad 10 MVA) pa sunki niso večji od moči transformatorja. Statistično obdelani podatki za velikost in pogostost obremenitvenih

sprememb kažejo, da je velikost sunkov obratno sorazmerna z njihovo pogostostjo. Pogostost sprememb ima pri njihovi določeni velikosti nekje svoj maksimum. Maksimum pogostosti ali frekvenca obremenitvenih sprememb se pojavlja v območju 3—7 Hz.

V območju raztaljenega vložka je makrostabilnost loka kljub izklopljeni dušilki ugodnejša. Spremembe toka so le do 30 % od nazivnega toka. Neugodnost tega obratovanja pa je v tem, da so zdajšnje spremembe obremenitve periodične in se gibljejo prav tako v izredno neugodnem območju 3—7 Hz. Zaradi periodično se ponavljajočih padcev napetosti v omrežju, ki je v bližnji okolici napajalnega mesta obločne peči, dobimo utripanje svetlobe s frekvenco, za katero je človeško oko najbolj občutljivejše. Utripanje svetlobe (flicker, flimmen) je najvidnejši pri žarnicah na žarilno nit, pa tudi televizijski aparati so zelo občutljivi za periodične spremembe.

Na mikrostabilnost lahko vpliva predvsem velikost induktivne upornosti, ki jo imamo v energetskem tokokrogu, in sicer raste stabilnost s kvadra-



Slika 13  
Napetost in tok električnega loka

tom induktivne upornosti. To izhaja iz vse večje časovne premaknitve napetosti in toka, kar ima za posledico, da je ob času, ko gre tok skozi vrednost nič, na loku že relativno visoka napetost. Ob tem prehodu nastajajo oscilacije z lastno frekvenco sistema RLC, ki še povečajo vžigno napetost (glej sl. 13). V tej zvezi naj omenimo, da tudi različna obloga peči vpliva na mikrostabilnost loka. Pri kisli oblogi je jonizacija zelo slaba, zato je gorenje loka težavno, medtem ko bazična obloga in dodatki apna v talino ugodno vplivajo na stabilnost.

Po oscilogramu sl. 13 vidimo, da tok loka ni sinusne oblike. Oblika toka se da matematično dobiti iz idealiziranih pogojev, da je napetost na transformatorju sinusna in da je napetost loka pravokotne oblike. Iz teh predpostavk sledi, da si tok električnega loka lahko predstavljamo sestavljenega iz dveh tokov: čistega sinusnega dela osnov-



ne frekvence ter iz toka, ki je eksponencialne oblike. Zaradi take oblike imamo v napajalni mreži obločnih peči višje harmonske tokove.

Meritve kažejo, da lahko pričakujemo:

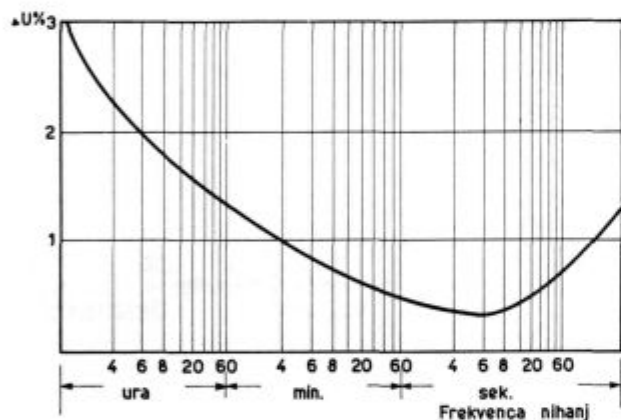
	$2 \times 50 \text{ Hz}$	$3 \times 50 \text{ Hz}$	$5 \times 50 \text{ Hz}$	$7 \times 50 \text{ Hz}$
za taljenje	7 %	10 %	5 %	5 %
za rafinacijo	5 %	15 %	5 %	3 %

Procent se nanaša na nazivni tok osnovne frekvence.

Taki višje harmonski tokovi pa so že neprijetni za elektro gospodarstvo: povzročajo nepotrebne padce napetosti v napajalni mreži, tvorijo inverzne komponente v generatorjih, so vzrok motenj telefonskih linij, vnašajo napake v meritve električne energije ter predstavljajo nekontrolirano nevarnost za preobremenitev kompenzacijskih kondenzatorjev.

### 2.3

Preden preidemo na izračun napetostnih sprememb, ki jih v napajalni mreži povzročajo elektro

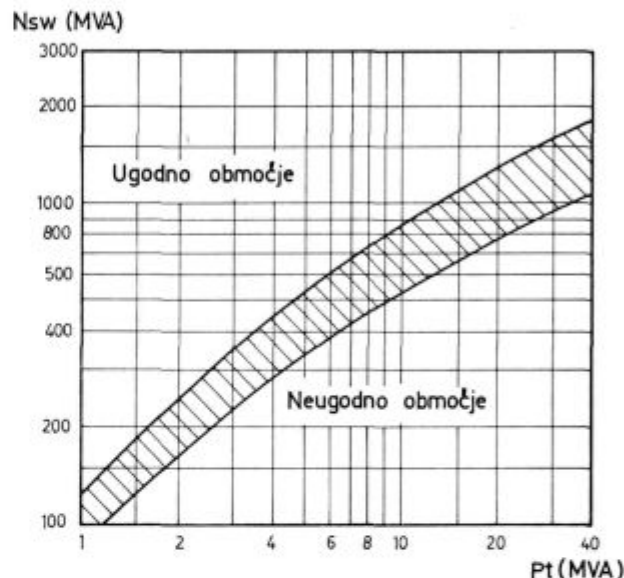


Slika 14  
Dopustne spremembe napetosti

obločne peči, si pogledjmo, kakšne napetostne spremembe glede na njihovo pogostnost so dopustljive glede na najbolj neprijetno posledico, t.j. glede na utripanje svetlobe svetilk. Na podlagi dolgotrajnih merjenj in testov o meji med prijetnostjo in neprijetnostjo utripanja svetlobe, ki so jih izvedli predvsem Amerikanci, se je osvojila krivulja dopustnih napetostnih sprememb v odvisnosti od njihove frekvence, ki jo prinaša sl. 14. Razni avtorji prinašajo nekoliko drugačne krivulje, vendar se po smiselnosti vse ujemajo; posebno so si avtorji edini v tem, da je človeško oko najbolj občutljivejše za svetlobne spremembe frekvence 1 — 10 Hz. Zanimivo je, da je največja občutljivost za televizijske aparate še nižja: 0,5 — 3 Hz.

Ker lahko smatramo, da sta za neugodne posledice obratovanja obločne peči kriva tako peč kot

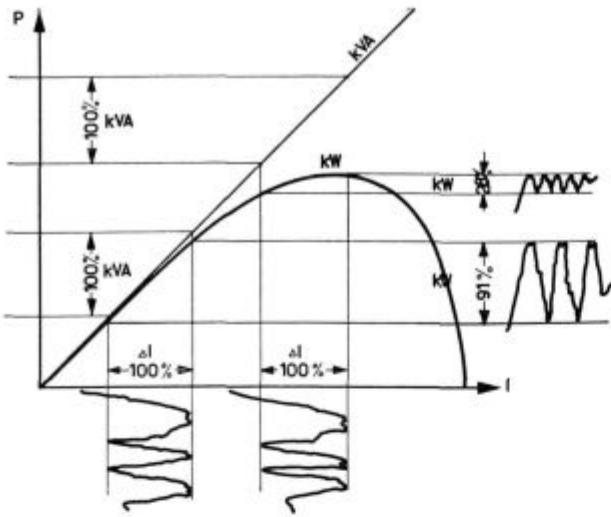
tudi napajalna mreža, ki te napetostne fluktuacije dopušča, so ameriški avtorji, ki so doslej največ naredili na tem področju, raziskali stanje obločnih peči v njihovi elektroenergetski mreži ter ugotovili ne samo kvalitativen, temveč tudi kvantitativen odnos, ki je potreben med napajalno mrežo in potrošnikom, v konkretnem primeru obločno pečjo. Kratkostična moč mreže oz. napajalne točke je ona kvaliteta sistema, ki je merodajna za njegovo togost nasproti napetostnim spremembam, ki jih povzročajo spremembe moči potrošnikov. Grob parameter za spremembe moči obločne peči, kot smo videli, pa je nazivna moč pečnega transformatorja. Odnos obeh parametrov kaže diagram po sl. 15. Diagram kaže ugodna in neugodna obrato-



Slika 15  
Zaželene kratkostične moči napajalne mreže

valna območja. Ugodna leže pri višjih kratkostičnih močeh mreže in manjših močeh pečnih transformatorjev, neugodna pa pri manjših močeh mreže in večjih pečeh. Da imajo velike obločne peči relativno manjše spremembe moči, se da razbrati tudi iz diagrama, kjer meja med obema območjema ni linearna. Jasno pa je, da je potrebno pri tem upoštevati minimalne kratkostične moči, ker so napetostne fluktuacije v tem primeru največje.

Tu je omeniti tudi značilnost obločne peči, zaradi katere spremembe elektrodnih tokov ne pomenijo vedno procentualno istih sprememb angažirane delovne moči. Iz sl. 16 vidimo, da v območju tokov maksimalnih moči na loku zaradi zakrivljene karakteristike neka 100 % tokovna sprememba povzroči le 28 % spremembo delovne moči. Območje maksimalnih moči je območje obratovanja v času taljenja, torej takrat, ko pričakujemo največje fluktuacije napetosti v napajalni mreži. Za te je zato pretežno odgovorna nihajoča jalova moč, ker niha skoraj sorazmerno elektrodnim tokom. Diagram delovne moči ima običajno



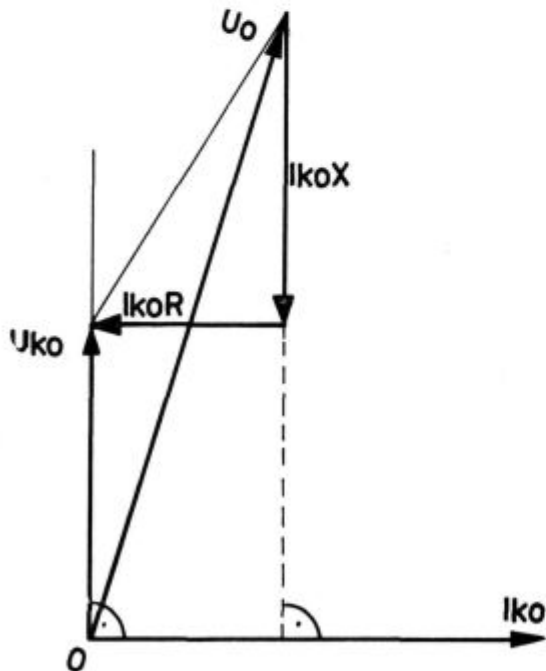
Slika 16  
Spremembe tokov in moči obločne peči

časovno lep potek, ne pove pa nam ničesar o spremembah tokov v napajalni točki.

Po drugih virih iz literature (švicarska komisija za elektrotermijo) so podana dovoljena procentualna razmerja med močjo pečnega transformatorja in minimalno močjo trifaznega kratkega stika, ki ne smejo presegati naslednjih vrednosti:

za eno peč	1,2 % — 1,6 %
za dve peči	2,0 % — 2,7 %
za tri ali več	2,8 % — 3,7 %

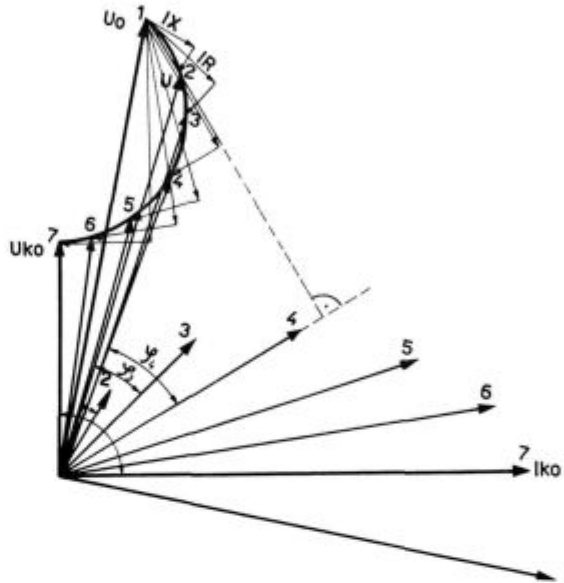
Le pri izpolnitvi gornjih pogojev lahko pričakujemo ugodne napetostne razmere v omrežju.



Slika 17  
Napetostne spremembe ob kratkem stiku obločne peči

Po sl. 17 je razvidno, kako se da dobiti maksimalna sprememba napetosti v napajalni točki, katere izvor ima parametre X R.

$U_0$  je napetost praznega teka,  $U_{ko}$  pa je napetost pri idealnem kratkem stiku peči ( $J_{ko}$ ). Razmerje da maksimalno napetostno spremembo v mreži. Po originalnem avtorjevem diagramu (sl. 18) se da dobiti položaj napetostnega kazalca za vsako obratovalno mesto obločne peči, če se poznajo karakteristike mreže, idealen kratkostični tok peči in fazni faktor obremenitve.



Slika 18  
Napetostne spremembe pri obratovanju obločne peči

Na podlagi gornjih ugotovitev lahko dobimo grobo oceno napetostnih sprememb v omrežju po naslednjih relacijah:

$$\Delta U \% = \frac{P'_{sr}}{N_{sw}} \cdot 100 \%$$

pri čemer je

$$P'_{sr} = \frac{\sum P_i}{N} \sqrt{N}$$

$P_i$  — moč posameznih pečnih transformatorjev  
 $N$  — število peči

Žal so vse gornje metode določitve ugodnosti oz. neugodnosti aproksimativne, točne rezultate dobimo le s pomočjo oscilografskih merjenj — torej šele takrat, ko je naprava v obratovanju.

Obstajajo možnosti, da se situacija okrog kritičnih napetostnih sprememb v omrežju izboljša. So pa te možnosti v večini primerov povezane z velikimi investicijskimi stroški. Če gledamo situacijo pri peči, je najenostavnejša metoda direkten priključek pečnega transformatorja na daljnovod

čim višje napetosti. Pri velikih napravah smo v to naravnost prisiljeni. Japonci so npr. svojo 200 t elektrooblačno peč moči 40 MVA priključili na napetost 154 kV.

V Ameriki so poizkušali stabilizirati napetost s pomočjo votle elektrode; stvar se ni preveč posrečila, kljub temu pa so opazili zanimiv pojav, da se je pri tem zmanjšala specifična poraba elektrod. Kot dajejo slutiti prvi poizkusi s predmagnetizirano dušilko, ki so bili opisani na V. mednarodnem kongresu za elektrotermijo v Wiesbadenu l. 1963, bi naj bila predmagnetizirana dušilka edina do sedaj poznana preprosta, relativno cenena in efektivna metoda za zmanjšanje napetostnih nihanj, ki jih povzroča oblačna peč. Dušilka, ki ima železno jedro iz orientirane transformatorske pločevine, katere magnetna karakteristika ima ostro koleno, je predmagnetizirana tako, da nastane pri tokovih, ki leže nad nazivnim tokom peči, na dušilki velik padec napetosti. S tem se tokovni sunki sami zmanjšujejo. Meritve na 30 t oblačni peči so pokazale, da so se maksimalni toki, ki so bili sicer velikosti  $1,75 J_n$ , zmanjšali na  $1,35 J_n$  in da se je maksimum pogostosti napetostnih sprememb premaknil od prvotnih  $1,1 J_n$  na  $0,75 J_n$ . O ekonomičnosti take dušilke za proizvajalca jekla govore podatki, da se je pri uporabi predmagnetizirane dušilke skrajšal čas taljenja za 14,7 % in da se je specifična poraba energije zmanjšala za 4,1 %.

Zboljševati situacijo okrog napetostnih razmer v elektroenergetskem sistemu je težje. Osnovna zahteva za kakršno koli izboljšanje je jačanje kratkostičnih moči v napajalnih mestih: s postavitvijo novih generatorjev, z graditvijo paralelnih daljnovodov itd. Švedi so izvedli dva eksperimenta v tej zvezi, ki zaslužita pozornost. Namesto dušilke pri oblačni peči so uporabili visokonapetostne serijske kondenzatorje. Rezultati kažejo določene prednosti take izvedbe. Poizkusili pa so tudi priključiti paralelno k peči sinhronski kompenzator, ki je sposoben slediti hitrim spremembam jalove moči. Njegov napetostni regulator so celo delno krmilila z vrednostjo spremembe impedance električnega loka peči. Verjetno pa ugodni rezultati niso povsem ekonomsko upravičeni.

## 2.4

Iz dosedanje analize elektro oblačne peči kot potrošnika električne energije lahko povzamemo:

a) Poraba delovne energije se v odvisnosti od asortimenta proizvodnje ter od vrste peči giblje običajno od 600 — 800 kWh/t, pri čemer odpade na raztalitev — tekoče jeklo temperature  $1550^{\circ}\text{C}$  — ca 450 — 500 kWh/t (teoretično 340 kWh/t).

b) Pri današnjem klasičnem stanju opreme peči in tehnologije se gibljejo povprečni fazni faktorji celotnega ciklusa med 0,80 in 0,85. Pri velikih agregatih, kjer je dosegljiva točka maksimalne moči na loku, pade fazni faktor v času taljenja med 0,74 in 0,78. Za raztaljeni vložek velja pravilo, da

se izogiblujemo faktorja 0,82. Mnogokrat dosegamo v tem območju višje fazne faktorje, kar govori o tem, da metalurgi obratujejo raje z višjimi napetostmi in nižjimi tokovi.

c) V posameznih obdobjih proizvodnega procesa je specifična poraba delovne energije porazdeljena tako, da je odpade na taljenje 65 % — 75 %, na oksidacijsko obdobje 15 % — 25 % ter na rafinacijsko obdobje 10 % — 15 %. Če vpihavamo v oksidacijskem obdobju v peč kisik, se čas oksidacije in specifična poraba energije v tem času zelo zmanjšata.

d) Računajoč od srednje angažirane moči celotnega procesa v peči, odpade na taljenje ca 170 % te moči, na oksidacijo 75 %, na rafinacijo pa 40 %.

e) Energetska bilanca energij v elektro oblačni peči nam da termični izkoristek naprave. Če pri tem smatramo, da je energija žilindre nekoristna, se ta giblje od 38 % do 48 %. Upoštevajoč energijo žilindre kot koristno energijo — to je za tehnološki proces neobhodno — pa se izkoristek povzpne tudi preko 60 %. Električne izgube niso majhne, saj se gibljejo od 8 % do 14 %.

Pri prikazovanju značilnosti elektro oblačne peči kot potrošnika električne energije ne moremo mimo prikaza nove tehnologije pridobivanja jekla v teh pečeh, ki se uvaja v anglosaškem svetu. Gre za obratovanje oblačnih peči z ultra visokimi močmi (ultra-high power operation), ki v osnovi spreminja način obratovanja peči, predvsem pri proizvodnji nizkoogljivega jekla. Celotno obratovanje se vrši s konstantno močjo v času taljenja in v času že raztaljenega vložka, in to z izrednimi močmi, saj so specifične obremenitve na tono oz. na  $\text{m}^2$  površine dvakrat tolikšne, kot pri dosedanjih napravah. Pri tem se obratuje z zelo kratkim lokom, kar pomeni, da vodimo na peč ekstremno velike tokove. Posledica tega so fazni faktorji v času taljenja 0,68—0,70, v času raztaljenega vložka pa komaj 0,60 — 0,62. Prav kratek lok — kot posledica visokih tokov — omogoča uporabo ekstremnih specifičnih moči, katerih sicer obzidava peči ne bi prenesla. Razdelitev sevanja med kopeljo in obzidavo je tu mnogo ugodnejša, kar dokazuje tudi velika oddaljenost tega obratovalnega področja ( $\cos \varphi = 0,60 — 0,70$ ) od področja maksimalnega erozijskega indeksa ( $\cos \varphi = 0,82$ ). Tako obratovanje je daleč od območij maksimalnih moči na loku oz. maksimalnih izkoristkov, saj se tu že močno približujemo obratovanju pod kratkim stikom. Posledica tega je majhno nihanje moči pri taljenju (majhna razlika med  $J_n$  in  $J_k$ ), kakor tudi zelo čista sinusoida elektrodnih tokov. Višjih harmonskih komponent praktično ni, kar govori o znanem pojavu dobre jonizacije pri kratkem električnem loku. Ekonomske prednosti takega obratovanja so predvsem v visoki izrabi naprave: faktor obremenitve je skoraj ena, časi šarž pa so zelo kratki (150 t oblačna peč s transformatorjem 80 MVA:

trajanje šarže 2<sup>h</sup> 16 min., proizvodnje 70 t/h, specifična poraba energije 450 — 490 kWh/t, specifična poraba elektrod 4 — 5,5 kg/t). Taki rezultati odtehtajo povečane stroške za jalovo energijo pa tudi za dražjo opremo peči.

## 2.5

Poznavanje maksimalne obtežbe, ki jo povzroča obločna peč v napajalnem sistemu ni važno samo pri izbiri elektroenergetske opreme, temveč tudi pri analizi obratovalnih stroškov. Vse današnje tarife za obračun porabljene električne energije vsebujejo elemente, po katerih je cena kWh odvisna poleg dnevnih in sezonskih postavk predvsem še od obtežbe. Po stroškovnem načelu obračunava elektro gospodarstvo najvišjo angažirano moč v določenem časovnem pasu (urna ali četrturna konica), ne glede na to ali je nastala samo enkrat v obračunskem obdobju ali pa je taka obtežba bila ves čas. Elektro gospodarstvo teži po čim boljšem izkoriščanju svojih naprav t. j. za njihove čim večje obratovalne ure.

Obratovanje obločne peči v enem ciklusu — od preboda do preboda — je tehnološko dokaj določeno. Ločili bi lahko samo klasičen način obratovanja (za program kvalitetnih in plemenitih jekel) ter obratovanja z ultra visokimi močmi (za proizvodnjo masovnih jekel). Detajlneje bomo obravnavali samo prvi način obratovanja, pri čemer bomo vpeljali naslednje odnose:

### a) Faktor obremenitve

$$f = \frac{P_{sr}}{P'_{max}}$$

pri čemer je  $P'_{max}$  konica (urna ali četrturna)

### b) Faktor preobremenjenosti

$$p = \frac{P'_{max}}{P_t \cdot \cos \varphi_{max}}$$

### c) Faktor obremenjenosti

$$o = \frac{P_{sr}}{P_t \cdot \cos \varphi_{sr}}$$

Povezava med posameznimi faktorji je naslednja:

$$f = o \frac{\cos \varphi_{sr}}{\cos \varphi_{max}}$$

Glede na urno ali četrturno konico so po izkušnjah dobljeni faktorji preobremenljivosti

$$= 1,2 - 1,4 \quad (p)_{4h} \\ (p)_{1h} = 0,7 - 0,9$$

Faktorji obremenjenosti pa se gibljejo v območju

$$o = 0,4 - 0,6$$

Ker med faznim faktorjem konične obtežbe in srednjim faznim faktorjem ni bistvene razlike, lahko zaključimo, da je

$$\frac{1}{f} = \frac{p}{o} = 1,5 - 1,8$$

Faktor preobremenjenosti ( $p$ ) je važen za dimenzioniranje opreme. Določa ga v prvi vrsti segrevanje transformatorja in dušilke.

Faktor obremenjenosti ( $o$ ) nam pove stopnjo izkoriščenosti transformatorja; kot vidimo, je ta v enem proizvodnem ciklusu slabo izkoriščen. Letni faktor obremenjenosti je še nižji, okrog 30 %, kar govori o tem, da je med ciklusi mrtev čas. Ta je seveda potreben za obnovo obzidave peči ter druga remontna dela.

Faktor obremenitve ( $f$ ) želimo imeti čim večji, ker pri tem ne bomo dobili samo večjega faktorja obremenjenosti, temveč predvsem skrajšanje proizvodnega ciklusa: faktor obremenjenosti pomeni tudi relativne obratovalne ure transformatorja.

Dokaj jasne razmere v primeru ene same peči postanejo takoj manj oprijemljive pri več pečeh, upoštevajoč še druge elektroenergetske potrošnike, ki obratujejo v istem sklopu. Če gledamo samo skupino več peči, vidimo, da je faktor obremenjenosti skupine enak faktorju obremenjenosti enote. Drugačne pa so razmere pri faktorju obremenitve: posamezne peči, obratujoče neodvisno druga od druge, enkrat sovpadajo z obdobji taljenja, drugič pa taljenje enih peči sovpada z obdobji raztaljenega vložka drugih. V prvem primeru je faktor obremenitve skupine peči enak kot pri eni peči, v drugem primeru pa je večji — jasno ugodnejši. Z rastočim številom peči slučajna sovpadanja dobivajo zakonitosti verjetnostnega računa, po katerem bi bil pri izredno velikem številu peči faktor obremenitve ena. Z vpeljavo strogega reda pri vrstnem redu obratovanja se da doseči ugoden faktor obremenitve že pri majhnem številu peči. Po podatkih iz literature, ki so dobljeni na osnovi računov, naj bi se dali doseči naslednji rezultati:

$$\text{ena peč: } \frac{1}{f} = 1,7$$

$$\text{dve ali tri peči: } \frac{1}{f} = 1,3$$

$$\text{štiri peči: } \frac{1}{f} = 1,0$$

Tako idealizirana teorija še ni bila v praksi potrjena. Razlogov je več: najvažnejši je gotovo ta, da obločna peč ni vlak, ki bi vozil točno po voznem redu in tako omogočal sinhronizacijo vožnje ostalih peči. Pri obratovanju peči se dogajajo nepredvidene stvari od različno dolgih korekcij analiz do nepredvidenih popravil. Predvsem to velja za malo-



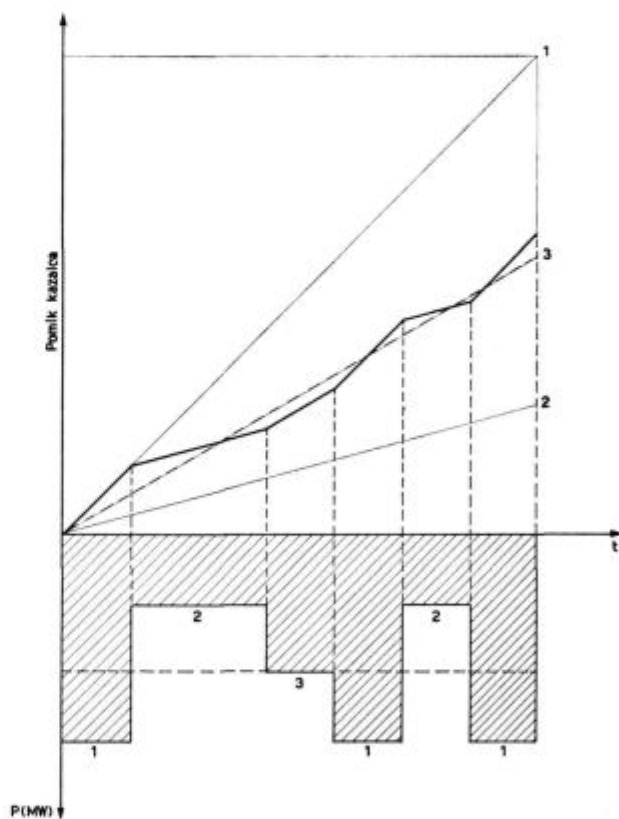
serijsko razdrobljeno proizvodnjo, kjer je kvečjemu nekaj desetlin šarž enake kvalitete, kar zahteva različne tehnologije. Od te pa so odvisni časi pri raztaljenem vložku (ena žindra, dve žindri). Kljub temu pa nas bodo naraščajoči stroški za porabljeni kWh prisilili, da moramo obratovalno anarhijo preprečiti. Pri tem lahko distributer električne energije veliko pomaga s svojim razumevanjem. Različni dogovori težijo predvsem k takemu obračunu konične obtežbe, da se ta obračunava ali celo omejuje le v času, ko primanjkuje moči v elektroenergetskem sistemu (v času opoldanske in večerne konice ali v času višje dnevne tarife itd.). Važen je tudi dogovor o trajanju konice. Urna konica dovoljuje več manevrskega prostora kot četrturna, pri tem pa je četrturna konica zaradi različnih faktorjev preobremenjenosti lahko tudi več kot 50 % višja od urne.

Za nekak osnovni red pri vrstnem redu obratovanja večjih peči skrbi že pogonsko osebje s težnjo po čim boljši izkoriščenosti pomožnih naprav. Kapacitete transportnih naprav (vozil, vagonov, žerjavov, tehtnic) bi bile malo izkoriščene, če bi lahko vsem pečem v isti fazi postopka istočasno stregli. Faze taljenja si zato sledijo že v grobem zaporedju, kar pa še ne garantira znosne konice. Neugodnosti nastopajo, če peči lahko bolj neodvisno obratujejo druga od druge kot npr. pri različnih lokacijah ali ob različnih namenih proizvodnje (za livarne ali valjarne). Upoštevati pa je še osnovno obtežbo drugih proizvodnih obratov, ki je sicer časovno bolj umirjena, pa tudi težje nadzorovana.

Ob velikih obločnih pečeh se je zato uvedla dispečerska elektroenergetska služba, katere naloga je, da usklajuje obtežbe na neki vnaprej dogovorjeni nivo ali pa celo sprejema ukaze od dispečerjev prenosno proizvodnih organizacij. Dispečer lahko že po poznavanju obratovalnega obdobja posameznih peči predvidi, kakšna bo obtežba v bodočem časovnem intervalu in ali bo potrebna njegova intervencija. Reduciranje obtežbe ali pa začasna ustavitve ene ali več peči mora biti izbrana tako, da ne prekinjamo tehnologije v taki stopnji, ki zahteva kontinuirano in nemoteno obratovanje. Brez večjih posledic je to možno le v času taljenja, tu pa je tudi efekt zaradi največjih angažiranih moči najboljši.

Predvidevanje obtežbe in odločanje o potrebi intervencije je stvar rutine. Sodobne merilne naprave ali pa računalniki posel zelo olajšujejo. Najbolj enostavni so tako imenovani čuvaji konice, ki signalizirajo nevarnost prekoračitve obtežbe ali pa celo odklapljajo za redukcijo predvidene potrošnike. Naprava je narejena tako, da sešteva oz. integrira produkte iz moči in časa. Vsakokratna poraba (moč) električne energije je sorazmerna hitrosti pomikanja kazalca, ki tako kaže stanje potrošnje. Drugi kazalec iste naprave se pomika enakomerno. Njegova hitrost je sorazmerno vnaprej določeni obtežbi, ki je ne želimo prekoračiti.

Iz primerjanja hitrosti vrtenja kazalcev bi lahko sklepali, ali je trenutna obtežba večja ali manjša od predvidene konične obtežbe. Vendar trenutne vrednosti moči niso tolikega pomena — odčitamo jih lahko z drugih instrumentov — važno je vedeti, s kakšno močjo smemo obratovati do konca opazovalne periode, da predvidenega povprečja periode, t. j. konice, ne bomo prekoračili. Če je kazalec dejanske porabe zaostal za kazalcem predvidene porabe, je bila v preteklem opazovanem obdobju povprečna obtežba nižja od predvidene. Če pa ga je prehitel, je bila povprečna obtežba v preteklem obdobju večja od predvidene. Če bomo torej hoteli v času konice obtežbo obdržati na predvidenem nivoju, jo je treba zmanjšati, da bo kazalec dejanske porabe zaostal toliko, da ga bo do konca opazovanega časa kazalec predvidene porabe vsaj dohitel. Razmere delovanja čuvaja konice so prikazane na sl. 19. Smeri posameznih premic ustrezajo na spodnjem delu prikazanim obtežbam. Nakloni premic so sorazmerni hitrostim kazalca stvarne obtežbe, pri čemer označuje debelo izvlečena stvarne obtežbe, pri čemer označuje debelo izvlečena premica gibanje kazalca predvidene obtežbe.



Slika 19  
Delovanje čuvaja konice

Premice imajo večji odklon od debelo izvlečene pri večjih trenutnih obtežbah od povprečno predvidene in obratno. Gibanje kazalca stvarne obtežbe predstavlja lomljena črta. Kazalec stvarne obtežbe prehiteva kazalec predvidene obtežbe, kadar imamo

stanje potrošnje nad premico predvidene obtežbe in obratno. Z enostavnimi računi se da določiti, kakšno mora biti zmanjšanje obtežbe v odvisnosti od preostalega časa, da se predvidena konica ne bi prekoračila; običajno pa dispečerji s časom dobé občutek oz. izkušnje, kako postopati v takih primerih.

Rezultati take kontrole so vsekakor ugodni. Pri štirih neenakih pečeh se je npr. faktor obremenjenosti skupine peči povzpela na  $1/f = 1,18$ , kar je zelo blizu prej navedenih teoretičnih vrednosti in kar je 30 % ugodnejše od stanja, ko še ni bilo take dispečerske službe. Ob tem se je zmanjšala konica za 20 %. Število dispečerjevih posegov v obratovanje peči pa ni bilo vznemirjajoče.

### 3. ENERGETSKO OBRATOVALNI ODNOSI PEČI

#### 3.1

Urna proizvodnja - produktivnost obločne peči, izražena v tonah proizvedenega jekla na uro, je odvisna v splošnem od velikosti peči. Velikost obločne peči je enosmiselno določena s kapaciteto tekočega jekla pred prebodom, torej z njenim volumnom, ki ga ustvarja posebna metalurško konstrukcijska geometrija. Dimenzije, kot so: premer peči, globina kopeli, oddaljenost oboka od dna, delilni krog elektrod itd., se z velikostjo peči spreminjajo po določenih zakonitostih, ki ne dovoljujejo večjih odstopanj. Vendar velikost (kapaciteta) obločne peči, izražena v tonah, ne pove še ničesar o času, v katerem se je tehnološki postopek pridobivanja jekla zaključil. Ta pa je, kot bomo videli, predvsem odvisen od moči transformatorja, ki dovaja energijo v peč. Čas trajanja šarže, t. j. čas od zalaganja od preboda, se da izraziti na naslednji način

$$t = \frac{G \cdot w}{P_{sr}}$$

pri čemer so  $G$  kapaciteta peči v tonah,  $w$  dejanska specifična poraba električne energije v kWh/t,  $P_{sr}$  pa srednja delovna moč v kW za časa trajanja šarže.

Urna proizvodnja je torej:

$$g = \frac{G}{t} = \frac{P_{sr}}{w} \text{ [t/h]}$$

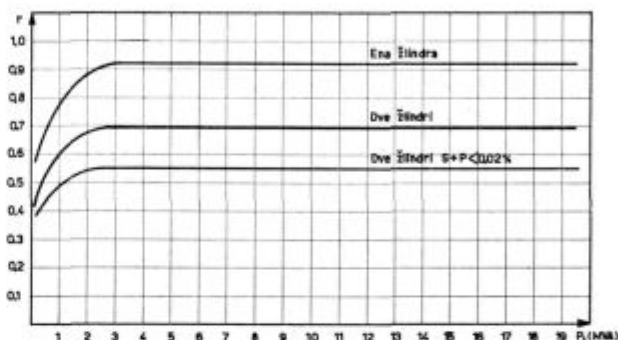
Ce vpeljemo v zgornji odnos že znani faktor obremenjenosti transformatorja ( $\sigma$ ), dobimo direktno zvezo med proizvodnostjo in močjo transformatorja:

$$g = \frac{\sigma \cdot \cos \varphi_{sr}}{w} \cdot P_t$$

Faktor produktivnosti  $r$  nam pove, kakšno urno proizvodnjo lahko pričakujemo pri moči transformatorja 1 MVA:

$$r = \frac{1000 \cdot \sigma \cdot \cos \varphi_{sr}}{w}$$

Faktor produktivnosti kaže sl. 20 v odvisnosti od kapacitete peči ter od načina tehnologije. Kot se vidi iz gornje enačbe, so v tem faktorju združene vse specifičnosti obratovanja peči. Predvsem je jasna direktna zveza s faktorjem obremenjenosti. Odvisno od tega, ali zasledujemo urno proizvodnjo posamezne šarže ali drugega časovnega



Slika 20  
Faktor produktivnosti

obdobja (mesečna, ali letna), je potrebno upoštevati ustrezne faktorje obremenjenosti transformatorja. Jasno je, da je faktor obremenjenosti ene šarže višji od mesečnega ali celo letnega. Iz slike 20 se dajo posamezni faktorji izračunati. V produktivnostnem faktorju je zajeta tudi specifična poraba energije kot obratno sorazmeren činitelj. Ker upoštevamo zaenkrat le globalne produktivnostne in energetske razmere peči, je ta odnos trivialen. Videli pa bomo, da obstaja tesna medsebojna zveza med vsemi dejavniki, ki vplivajo na faktor produktivnosti. Ta se giblje v razponu

$$r = 0,50 - 0,75$$

Končno lahko zapišemo, da je produktivnost obločne peči

$$g \text{ [t/h]} = r \cdot P_t \text{ [MVA]}$$

Recipročna vrednost produktivnosti pomeni specifični predelovalni čas, t. j. čas, ki je potreben za izdelavo 1 t jekla. V obratovanju obločne peči ločimo predvsem dve obdobji: taljenje in čas raztaljenega vložka. Kot je razvidno iz prejšnjih izvajanj, je proces taljenja čisto v rokah elektroenergetskih razmer, medtem ko je čas raztaljenega vložka metalurško tehnološka zadeva. Analogno temu lahko tudi specifični predelovalni čas razstavimo na specifični predelovalni čas za taljenje in

na specifični predelovalni čas pri raztaljenem vložku:

$$\frac{1}{g} = \frac{1}{g_t} + \frac{1}{g_r}$$

Recipročna vrednost produktivnosti nekega ključnega tehnološkega ciklusa je torej enaka vsoti recipročnih vrednosti produktivnosti posameznih faz postopka.

Produktivnost taljenja se da izraziti s časom, ki je potreben za taljenje

$$t_i = \frac{G \cdot \delta_o}{P_{max} \cdot \eta_x - P_{pt}}$$

Električni izkoristek v času taljenja je odvisen od faktorja preobremenjenosti:

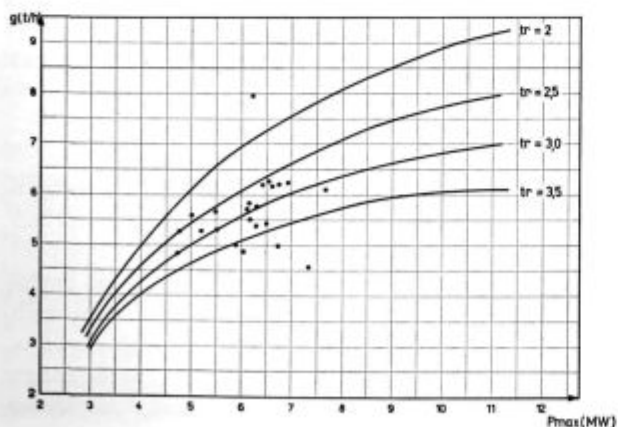
$$\eta_x = 1 - (1 - \eta_o) \cdot p^2$$

pri čemer je treba — po definiciji upoštevati odvisnost faktorja preobremenjenosti od faznega faktorja. Preobremenjenost računamo običajno za nazivno napetost transformatorja. Iz navedenega sledi:

$$g_t = \frac{1}{\delta_o} (P_{max} \cdot \eta_x - P_{pt})$$

$$g_r = \frac{G}{t_r}$$

Iz enačb je razvidno, da je produktivnost obločne peči neposredno odvisna od maksimalne električne moči, ki jo transformator zmore. Odvisna pa je tudi od tehnologije: skrajšanje časa  $t_r$  pomeni njeno neposredno zvišanje. Za konkreten primer obratovalnih zmogljivosti obločne peči kaže zgornje razmere sl. 21. Omeniti je, da pomeni  $P_{max}$  srednjo delovno moč, izmerjeno na transformatorju v času taljenja. Prekinitve obratovanja v času taljenja zaradi ponovnega zalaganja ali zaradi delovanja zaščite zmanjšuje povprečno vrednost moči.



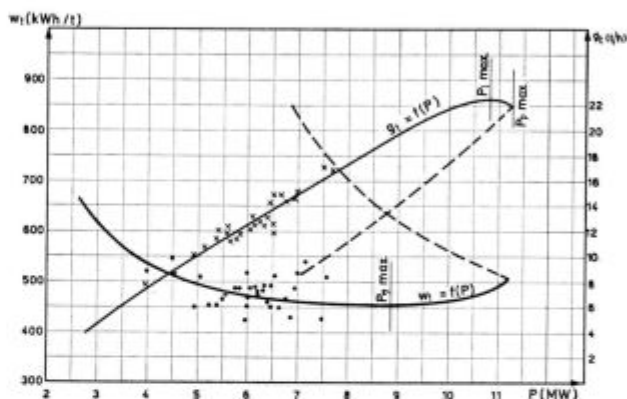
Slika 21  
Produktivnost obločne peči

Specifična poraba električne energije za taljenje je odvisna:

$$w_t = \frac{\delta_o}{\eta_x - P_{pt}/P_{max}}$$

in se giblje okrog 45 kWh/t. Termični izkoristek taljenja je pri tem ca 80 %. Razni avtorji dokazujejo, da je potrebno pri izračunih upoštevati teoretično specifično porabo za taljenje 365 kWh/t in ne 340 kWh/t, in sicer zaradi različnih eksotermnih procesov v času taljenja.

Jasno je, da vrednost števila v zgornji enačbi predstavlja celotni izkoristek procesa. Kot smo videli že v prvem poglavju, ima izkoristek svoj maksimum in pri njem je specifična poraba električne energije najmanjša. Območje obratovanja pri maksimalnih izkoristkih se lepo vidi iz sl. 22.



Slika 22  
Produktivnost in specifična poraba energije obločne peči pri taljenju

Krivulja specifične porabe električne energije ima blag in neizrazit minimum. Zaradi tega se toliko lažje odločimo za moči taljenja, ki leže nad močmi maksimalnih izkoristkov, saj s tem lahko bistveno zvečamo produktivnost. Večanje moči ima postavljene meje: največja delovna moč, ki jo lahko izmerimo na transformatorju ( $P_{p,max}$ ), nastopa pri faznem faktorju 0,71. Največja delovna moč, ki jo dobimo na električnem loku ( $P_{1,max}$ ) in pri kateri je produktivnost najvišja, nastopa pri nekaj nižji moči od  $P_{p,max}$  (fazni faktor 0,76). Razmere so vidne na sliki 22. Vidimo, da ima produktivnost  $g_t$  izrazit maksimum, zato je nesmiselno preobremenjevati transformator preko  $P_{1,max}$  oziroma prekoračevati tok, pri katerem bi bil fazni faktor slabši od ca 0,76.

Sl. 22 nam kaže tudi vrednosti, ki so bile dosežene v konkretnem primeru. Opazna je nizka povprečna moč v času taljenja, kar je posledica mnogih prekinitvev predvsem zaradi večkratnega dolgotrajnega zalaganja. Črtnane krivulje predstavljajo vrednosti parametrov za moči  $P_{max}$ , ki bi bile dosežene pri večjih elektrodnih tokovih, kot je

$J_{pmax}$ . To je območje tokov v desni polovici krožnega diagrama ali območje faznih faktorjev, ki so manjši od 0,71.

Visoka produktivnost ter nizka poraba električne energije sta v veliki meri odvisna od organiziranosti tehnološkega postopka.

Pokazali bomo nekaj parametrov, kako kvantitetno vplivajo na rezultate obratovanja. Dvignjene razžarjene elektrode so pogost in nujen pojav pri obratovanju: 10-minutno prosto sevanje z njihove površine predstavlja izguba ca 25 kWh na dolžinski meter sevalne površine. Pri zalaganju s košaro je peč odprta, tako da obok in kad peči, katerih obzidava je segreti tudi nad 1500°C, neovirano sevata v prostor. Hitre manipulacije so tu izrednega pomena ne samo zaradi izgub energije, temveč tudi zaradi kvarnega vpliva hitrih temperaturnih sprememb na vzdržnost obzidave. Sl. 23 kaže potek temperature obzidave oboka in kadi v odvisnosti od časa kakor tudi izgubljanje akumulirane energije obzidave. Sl. 24 nazorno kaže odvisnost specifične porabe energije od tako imenovanih mrtvih časov: popravila dna, časi zalaganja, čakanje, vzdrževalna dela itd. Prikazane meritve dajejo zgovoren podatek: pri četrturnem skrajšanju mrtvih

časov lahko pričakujemo tudi za 50 kWh/t zmanjšano specifično porabo energije!

O vplivu časa  $t_r$  (čas raztaljenega vložka) na produktivnost smo že govorili, isti parameter pa direktno vpliva tudi na porabo energije. Skupno porabo električne energije lahko določimo iz naslednje relacije:

$$w = w_t + w_o + w_r$$

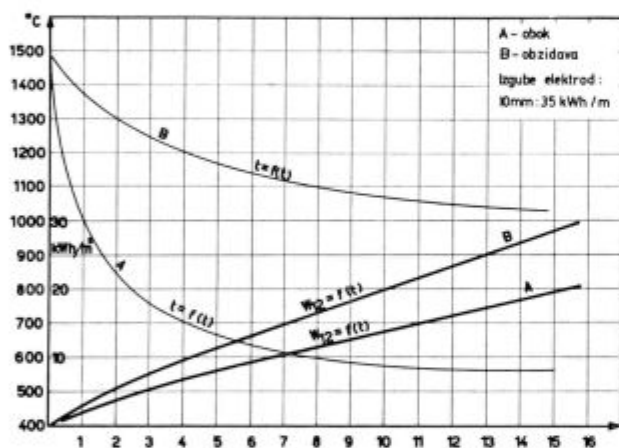
pri čemer je:  $w_t$  specifična poraba električne energije za taljenje —  $w_o$  je konstanta in predstavlja porabo energije za formiranje žlindre, za segrevanje taline nad talilne temperature, upoštevajoč pri tem bilanco reakcijskih energij procesa;  $w_r$  je energija toplotnih izgub, ki je odvisna:

$$w_r = \frac{P_{pr}}{G} \cdot t_r$$

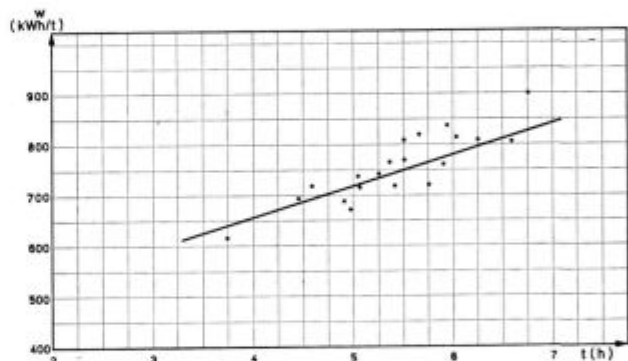
Skupna specifična poraba električne energije obločne peči je torej

$$w = \frac{\delta_o}{\eta_x - P_{pt}/P_{max}} + w_o + \frac{P_{pr}}{G} t_r$$

Sl. 25 kaže zgornji odnos. Meritve, ki so prikazane ob izračunanih specifičnih porabah, dokazujejo pravilnost gornjih izvajanj. Vrednosti  $w_o$  se gibljejo med 10 % in 20 % celotne specifične porabe, močno pa so odvisne od tehnologije (ena ali



Slika 23  
Hlajenje oboka in kadi obločne peči

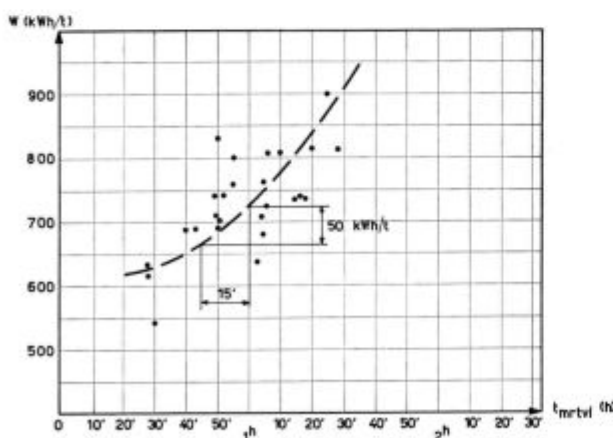


Slika 25  
Poraba energije v odvisnosti od trajanja šarže

več žlinder, vpihavanje kisika itd). Porabe na sl. 25 so prikazane za določeno moč ( $P_{max} = konst$ ), čas  $t$  je čas celotne šarže ( $t = t_t + t_r$ ).

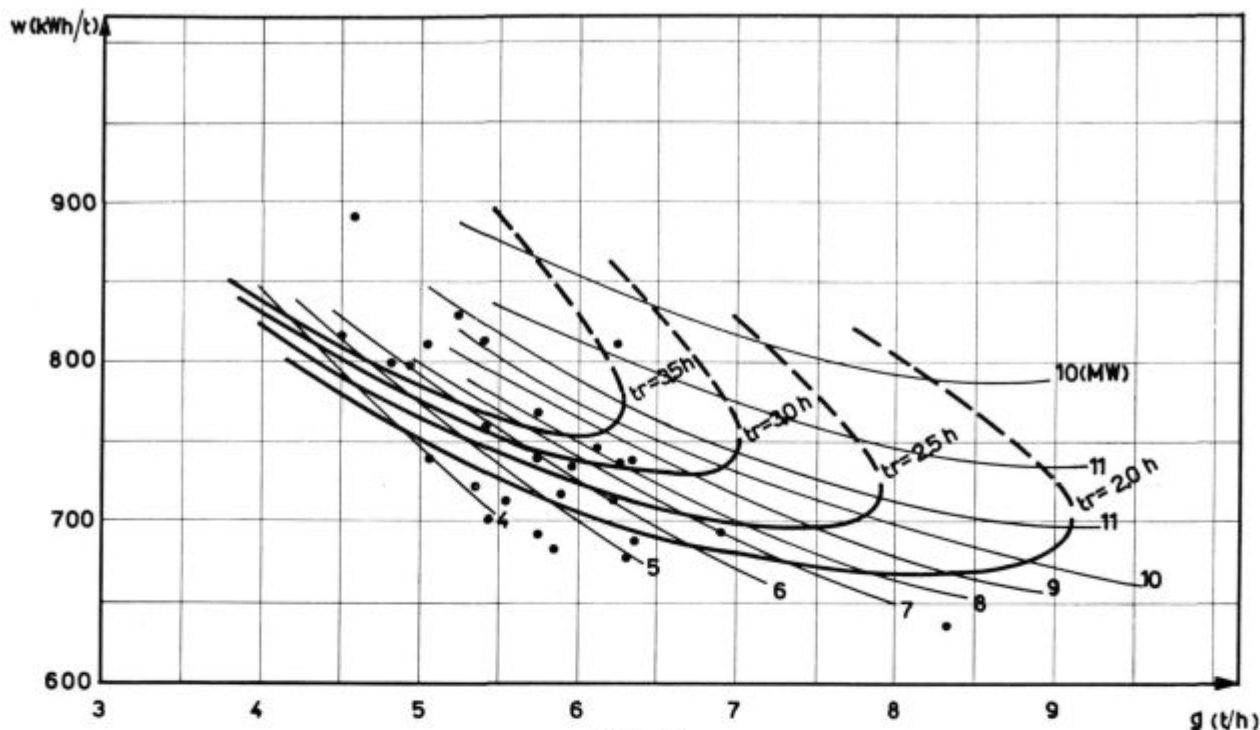
Če končno povežemo definicijski odnos za produktivnost obločne peči z njeno specifično porabo električne energije, dobimo funkcijo  $w = w(g)$ , katera najvažnejši parametri so  $P_{max}$  (moč za časa taljenja) in  $t_r$  (čas raztaljenega vložka). Te zanimive krivulje so prikazane na sl. 26. Kažejo ponovno značilnosti obločne peči, t. j. območje blagih minimumov porabe energije ter območja izrazitih maksimalnih produktivnosti. Prehod na drugo stran maksimalnih produktivnosti pomeni obratovanje z elektrodnimi tokovi nad  $P_{pmax}$ .

Funkcije  $w = w(g)$  so interesantne predvsem zaradi tega, ker kažejo odnos med vrednostmi, ki so najlažje merljive in ki se v proizvodnji vedno



Slika 24  
Vpliv mrtvih časov na specifično porabo energije





Slika 26

Vpliv produktivnosti na specifično porabo energije

beležijo. Če si izračunamo krivulji za mejne vrednosti  $t_r$  (za minimalni in maksimalni čas raztaljenega vložka), dobimo območje, v katerem mora potekati normalna proizvodnja.

### 3.2

Pri dosedanjem obravnavanju energetske produktivnosti odnosov obločne peči nismo obravnavali činitelja, ki vpliva prav tako na oba parametra peči. To so toplotne izgube ( $P_p$ ), določitev katerih pa sega že v razdelitev energij ali v energetske bilanco. Kot pri večini toplotnih strojev tudi pri obločni peči ni mogoče določiti vseh energij neposredno. Meriti se daje enostavno le določene veličine. Grobe predpostavke vnašajo v detajle energetske bilance napake, kar pa ni poseben problem, saj nas pri energetske produktivnosti odnosih zanimajo le globalne razmere. Najvažnejša predpostavka pri razdelitvi energij, ki je pa tudi najbolj dvomljiva, je trditev o konstantnosti skupnih izgub v času obratovanja. Po tej tezi obločna peč oddaja toplotno moč ves čas enakomerno v prostor. To dokazuje več avtorjev, pa tudi določene meritve kažejo, da je to v prvem približku res tako. Če ločimo moč izgub predvsem na dva dela: na električne izgube moči ter na ostale toplotne izgube, potem lahko rečemo, da je za čas taljenja

$$P_{izg} = P_{izgel} + P_{pt}$$

Električne izgube so v času taljenja največje, ker takrat tečejo preko nadomestnih upornosti elektroenergetskega tokokroga R največje moči. V

času raztaljenega vložka so te moči ca 5-krat manjše.

Zaradi (približno) kvadratnega odnosa so pri tem električne izgube zanemarljive, zato lahko trdimo, da imamo za čas raztaljenega vložka le toplotne izgube, ki pa so po prvotni predpostavki

$$P_{pr} = P_{izg}$$

Če pregledamo stvarno obratovanje obločne peči, vidimo, da so v času:

1. Taljenja
  - a) Izgube sevanja in konvekcije zaradi hladnejšega vložka in obzidave manjše
  - b) Izgube s plini so manjše. Plini zaradi odgora so pri nižjih temperaturah manjši
  - c) Izgube s hladilno vodo peči so zaradi nižjih temperatur manjše
2. Raztaljenega vložka
  - a) Izgube sevanja in konvekcije so nekaj večje
  - b) Izgube s plini so večje, posebno v času oksidacije
  - c) Izgube s hladilno vodo so večje zaradi večjih temperatur oboka, vrat, elektrod
  - d) Električne izgube so bistveno manjše.

Pri energetske bilanci obločne peči je poleg toplotne vsebnosti jekla — entalpije jekla upoštevati še kot koristno energijo entalpijo žilindre. Točnejša bilanca mora upoštevati poleg električne energije kot dovedeno energijo tudi reakcijsko toploto. Njen izračun zahteva točno poznavanje endotermnih in eksotermnih metalurških procesov. Reakcijska tolota dosega ca 15 % skupne dovedene

energije, nastaja pa predvsem v času oksidacije in rafinacije.

Skupne toplotne izgube v času taljenja so

$$P_{izg} = G \frac{w_t - \delta_o}{t_t}$$

Če zmanjšamo njihovo vrednost za električne izgube, dobimo toplotne izgube obločne peči pri taljenju

$$P_{pt} = P_{izg} - P_{izgel}$$

Električne izgube se dajo enostavno izračunati iz posameznih ohmskih upornosti ter iz tokov, pri katerih se je vršilo taljenje. Vendar povprečni talilni toki zaradi zelo spreminjajočih se vrednosti dajo zelo grobe ocene električnih izgub. Mnogo boljši rezultati se dobijo z  $J^2t$  — števcem, iz katerega odčitkov se dobe izgube:

$$P_{izgel} = 3 \cdot k \frac{J_t^2}{t} R$$

Določitev toplotnih izgub v času raztaljenega vložka ( $P_{pr}$ ) je bila že omenjena. Za kontrolo teh izgub nam je lahko dovedena moč v času raztaljenega vložka, točneje v času rafinacije. V prvem približju je tokrat dovedena moč enaka toplotnim izgubam:

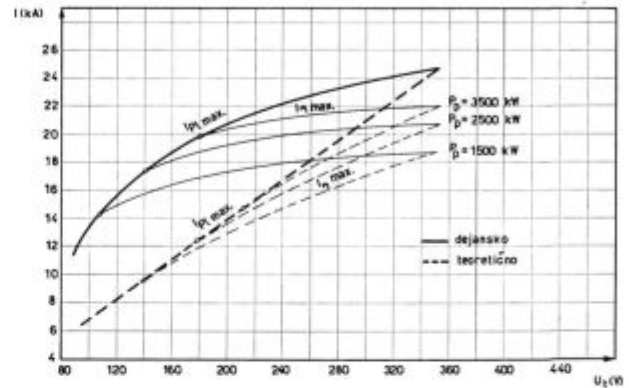
$$P_{rat} = P_{pr}$$

### 3.3

Graditelji peči dajejo običajno konstrukcijske podatke, eventualno še podatke o produktivnosti in specifični porabi električne energije za taljenje. Za podrobnejše poznavanje obločne peči pa je potreben niz podatkov. Večina teh je odraz specifičnih pogojev obratovanja in jih je zato mogoče dobiti le z meritvami. V prvi vrsti so važne meritve električnih parametrov obločne peči ter meritve energetske proizvodnih parametrov. Že te meritve zajemajo beleženje preko 40 spremenljivk. Če pa bi hoteli obseči še metalurške kvantitativne in kvalitativne odnose, vzdržnosti obzidave, porabe elektrod in pomožnih materialov, temperaturne razmere itd., bi število spremenljivk naraslo do takih meja, da bi jih bilo mogoče obdelati le z računskim strojem.

Električne meritve imajo predvsem namen določiti impedanco peči. Najenostavneje se dajo dobiti vrednosti z meritvami kratkega stika. Pri nižjih napetostih regulacijskega pečnega transformatorja se elektrode potopijo v raztaljeni vložek. Instrumenti se dajo zelo hitro odčitati, ker takoj po potopitvi elektrod nastopi stacionarno stanje. Tako vršimo meritve z vedno večjimi napetostmi do znosnih preobremenitev transformatorja. Pri tem je potrebno pretokovno zaščito transformatorja blokirati. Meritve z nazivno primarno napetostjo lahko izvršimo le do ca 75 % sekundarne napetosti, kratkostično impedanco za nazivno napetost je zato ekstrapolirati. Z  $W$ -metrično in  $U - J$

metodo se dajo dobiti reaktance in induktance. Njihov potek glede na sekundarno napetost transformatorja običajno ni linearen. Temu so predvsem vzrok različne vezave regulacijskega transformatorja, od katerih so v posameznih napetostnih stopnjah odvisne kratkostične napetosti. Vpliv na nelinearnost poteka impedance pri različnih stopnjah je iskati tudi v negativni uporovni karakteristiki elektrod kakor tudi pri neraziskanih prehodnih upornostih elektroda — talina ter pri upornosti same taline.



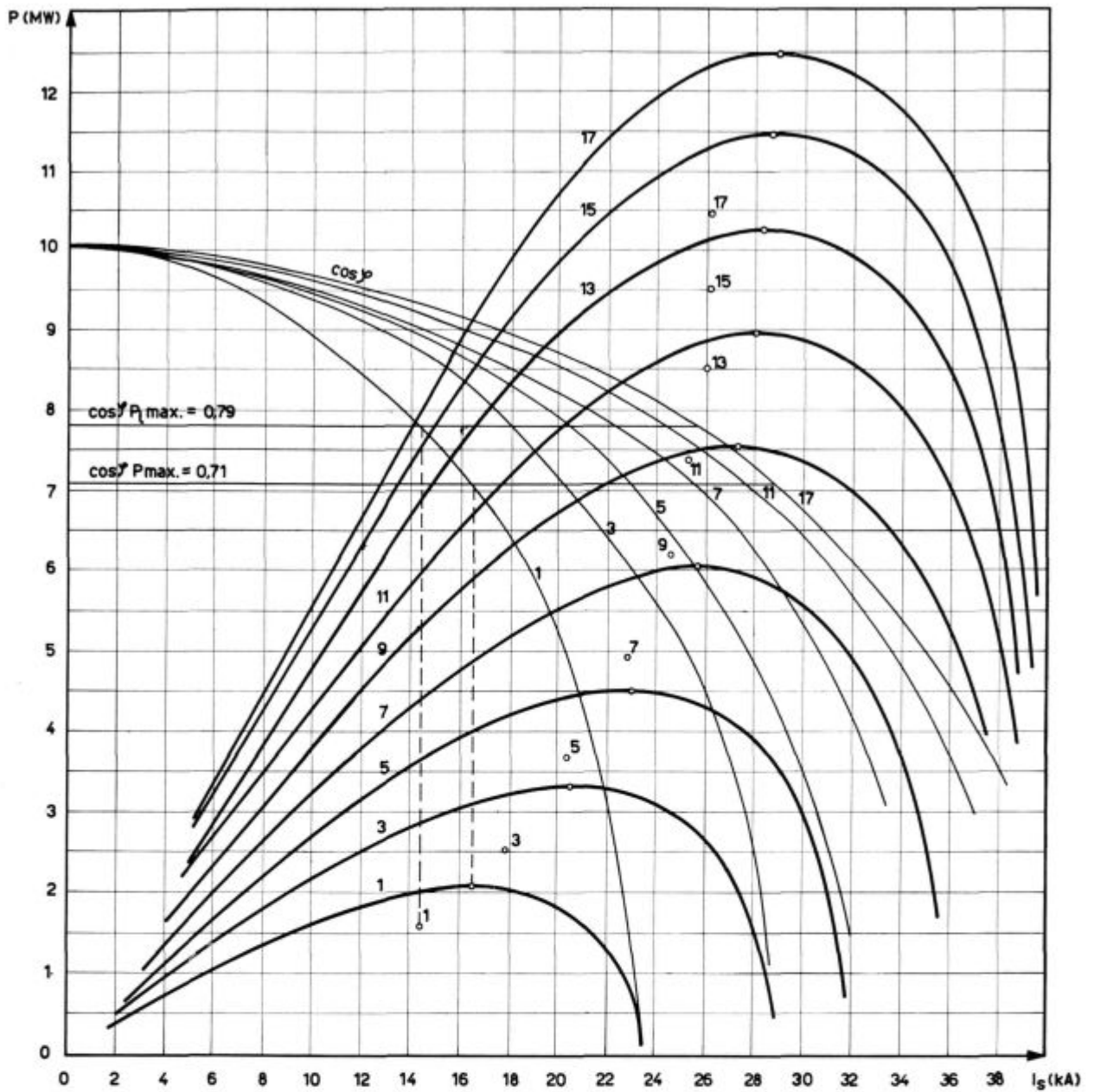
Slika 27

Režim maksimalne moči, toka in maksimalnih izkoristkov

S pomočjo znanih impedanc se dajo določiti za vsakdanjo prakso izredno važni obratovalni diagrami, kjer nas najbolj zanimajo vrednosti tokov, pri katerih je električna moč na loku maksimalna. Pri konstantni impedanci potekajo te vrednosti linearno z napetostjo, sl. 27 pa nam kaže, kako bistvene so razlike med dejanskimi in teoretičnimi vrednostmi. Realni obratovalni diagram je prikazan na sl. 28. Le tako prikazane razmere so lahko vodilo za gospodarno vodenje obratovanja obločne peči.

Na podlagi izmerjenih impedanc peči, transformatorja in dušilke in ob poznavanju kratkostične moči napajalne mreže in njenega stanja je mogoče končno preverjati pravilnost velikosti dušilke. V večini primerov so dušilke prebogato dimenzionirane. Po eni strani so se s tem hoteli zavarovati dobavitelji peči, po drugi strani pa so se razmere v napajalnem elektroenergetskem sistemu sčasoma le izboljšale. Kratkostične razmere so danes marsikje bistveno večje kot pred leti. Sl. 10 kaže, kaj pomeni za obločno peč zmanjšanje njene impedance od 45 % na 40 %, kar se je doseglo z zmanjšanjem impedance dušilke od prvotnih 10 % na 5 %. Pri enakih elektrodnih tokovih smo s tem povečali delovno moč za ca 10 %, kar je bistveno spremenilo energetske produktivnostne pokazatelje.

Meritve energetske proizvodnih parametrov obločne peči temeljijo predvsem na meritvah tež, časov in energije. Najvažnejše so teže metalnega in nemetalnega vložka, teže odlitih ingotov in žlindre. Zasedovati je čase taljenja, oksidacije, rafinacije, čase šaržiranja in mrtve čase. Ustrezno časom je



Slika 28  
Realni obratovalni diagram

beležiti porabo delovne in jalove energije, čas vklopa oz. izklopa dušilke. Interesantne so vrednosti napetosti, elektrodnih tokov in faznega faktorja, s katerimi so določena obratovalna mesta v obra-

tovalnem diagramu. Vse parametre je neprekinjeno zasledovati vsaj 50 šarž. Take meritve predstavljajo veliko delo, vendar jih je le ob takem številu možno obdelati s primerno statistično verjetnostjo.

#### Literatura

1. Richtlinien für den Anschluss von Lichtbogenöfen, ÖZE JHg 16/9
2. Lichtbogenschmelzöfen grosser Leistung, H. I. Forst, Berg — und Hüttenmännische Monatshefte 1961/9
3. Lichtbogenstahlschmelzöfen als elektrische Verbraucher und Möglichkeiten zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit, H. Lürig (Detto)
4. Arbeitsbedingungen und Wirkungsgrad grosser Lichtbogenstahlschmelzöfen, H. Forst Elektrowärme 1960/6
5. Die elektrische Ausrüstung moderner Lichtbogenstahlschmelzöfen, H. Forst BBC — Nachrichten 4/1957, 2/1958
6. Einführung in die Probleme des elektrischen Lichtbogen und Widerstandsofens, Dr. ing. Erich Klass (Springer — Verlag, Berlin 1951)

7. The Use of Series Capacitors in Conjunction with Electric Smelting Furnaces, H. Flaath (ASEA 7791 E/497/66)
8. Stand und Entwicklung der Elektrodenregelung der Lichtbogenstahlöfen, (Stahl und Eisen 1954)
9. Electric Furnace Steelmaking I, II (Interscience Publisher New York 1962)
10. Beitrag zur Kenntnis des Lichtbogenofens unter besonderer Berücksichtigung des Grossraumofens für die Stahlerzeugung, Harms F. (Stahl und Eisen 83, Heft 5)
11. Grundlagen für die Symmetrierung von Drehstrom — Lichtbogenofen, Duechting W. (Elektrowärme Nr 19, 1961)
12. Elektrische Schmelzöfen für Eisenmetallurgie, Okorokow (VEB Verlag Berlin 1953)
13. Erfahrung bei der Messung von Spannungsschwankungen an Lichtbogenöfen, Krabiell (Elektrowärme Nr 11, 1962)
14. Savremena elektrolučna peč za topljenje čelika i njen uticaj na energetski sistem, ing. R. Bulajić. (Savetovanje Lučna i indukciona peč u elektrometalurgiji i livarstvu — Maribor 1963)
15. Problemi automatizacije elektrolučnih peći, ing. I. Černelč, ing. K. Rožič (Savetovanje o automatizaciji u crnoj metalurgiji Beograd 1962)
16. Elektromagnetne sile na električni oblok, prof. dr. ing. Venče Koželj (Posvetovanje o stikalni tehniki, Ljubljana 1964)
17. Vergleichende Betrachtungen über die hydraulischen und elektromotorischen Elektrodenregelungen von Lichtbogenschmelzöfen sowie über die Grenzen ihrer Leistungsfähigkeit, A. Driller und H. Ernst (IV. kongres UIE 1959)
18. Neuere Entwicklungen auf dem Gebiet der elektrohydraulischen Elektrodenregelung von Lichtbogenschmelzöfen, R. Lambert (IV. kongres UIE 1959)
19. Electricity supply and control for large arc furnaces, H. Sheppard and E. Freeman (V. kongres UIE 1963)
20. Reduction of Current Fluctuation and Efficiency. Improvements by Power Saturable Reactor in Steel Melting Arc Furnace Operation, S. Hazumi and M. Yoskino (V. kongres UIE 1963)
21. Problems of Lamp Flicker caused by Large Electric Arc Furnace for Steel Production in Japan, T. Tinguzi (V. kongres UIE 1963)
22. Das Betriebsverhalten von Lichtbogenstahlschmelzöfen und ihr Einfluss auf Drehstromhochspannungsnetze, V. Lanner und P. Torseke (V. kongres UIE 1963)
23. Beitrag zum Problem der Rückwirkungen von Lichtbogenöfen auf die Betriebsverhältnisse der Verteilnetze, P. Senn (V. kongres UIE 1963)
24. Principles of Highproduction Electric Steel Furnace Production, Schwabe (V. kongres 1963)
25. Electricity Supply and Control for Large Arc Furnaces Sheppard, Freeman (V. kongres 1963)
26. Reduction of Current Fluctuations and Efficiency. Improvements by Power Saturable Reactor in Steel Melting Arc Furnace Operation, Hazumi, Yoshino (V. kongres UIE 1963)
27. Problems of Lamp Flicker caused by Large Electric Arc Furnaces for Steel Production in Japan, Zinguzi (V. kongres UIE 1963)
28. Untersuchungen über resultierende Spannungsschwankungen durch gleichzeitigen Betrieb mehrerer Lichtbogenöfen, welche am gleichen Netzknoten angeschlossen sind, Werner L. (V. kongres UIE 1963)
29. Beitrag zum Problem der Rückwirkungen von Lichtbogenöfen auf die Betriebsverhältnisse der Verteilnetze, Sen, Lememmer (VI. kongres UIE 1968)
30. Experience with Ultra-high Power Electric Furnace Operation, Schwabe — Robinson (VI. kongres UIE 1968)
31. Modern Methods of Automatically Controlling Electric Furnaces, Owen (VI. kongres UIE 1968)
32. Economical Flicker Reduction for Arc Furnaces, Friedlander, Young (VI. kongres UIE 1968)
33. The Measurement of Voltage Fluctuations caused by arc Furnaces, Kendal (VI. kongres UIE 1968)
34. Untersuchung der optimalen Einstellung des Überstromschutzes an einem Transformator eines Lichtbogenofens, Jahn, Ehrig (VI. kongres UIE 1968)
35. Progress in Electric Power Supply to Arc Furnace Loads in Japan, Zinguzi (VI. kongres UIE 1968)
36. Improvements in Performance by New Design of Six Electrode Arc Furnace, Bazeley, Harrison (VI. kongres UIE 1968)
37. Der Lichtbogen im Elektrostahlhofen unter dem Einfluss ionisierender Mittel, Dunski, Kegel (VI. kongres UIE 1968)
38. Electrical Heating and Stirring of Melts in Ladles, Hammerlund, Sundberg (VI. kongres UIE 1968)
39. Methode zur Bestimmung der Betriebszustände von unsymmetrischen Lichtbogen — Drehstromofenanlagen Kurbel (VI. kongres UIE 1968)

## ZUSAMMENFASSUNG

In den drei Kapiteln dieses Artikel sind die wichtigsten Merkmale eines Elektrolichtbogenofens gezeigt. Im ersten Kapitel werden die elektrischen Verhältnisse der ganzen Anlage besprochen. Vor allem die Einschmelzzeit und die

Möglichkeit im Betrieb mit einem minimalen spezifischen Energieverbrauch zu arbeiten. Es wird gezeigt, dass das Schmelzen mit einer maximalen Kraft am Lichtbogen ökonomischer ist denn die Einschmelzzeit beträgt nur 80 % der



Zeit welche bei einem minimalem Energieverbrauch nötig wäre. Es ist auch ein Überblick über die Möglichkeiten für eine höchstökonomische Betriebsweise gegeben. Die wichtigsten Faktoren dabei sind die Grösse der Ofenimpedanz und die Möglichkeit der Überbelastung des Ofentransformators. Nach dem Einschmelzen sind die elektrischen Verhältnisse am Ofen völlig anders. Der Lichtbogen brennt ruhig, die Drossel ist nicht mehr nötig die Energiezufuhr ist wesentlich kleiner. Wegen der völlig freien Energiestrahlung des Lichtbogens in den Ofen ist dem Lichtbogen eine solche Geometrie zu geben, dass die Strahlung des Lichtbogens auf die Ofenausmauerung so klein wie möglich sein wird. Da die Lichtbogeneometrie von den rein elektrischen Grössen bestimmt wird ist über diese Grössen von dem amerikanischen Forscher der Lichtbogenöfen Mr. Schwabe der sogenannte Erosionsindex eingeführt worden. Die Verfolgung solches Erosionsindex welcher ein Massstab für die Wärmebeanspruchung des Ofens sein sollte ist nicht geeignet, weil der Index eine blosse Zahl darstellt. Der Autor hat es bewiesen, dass der grösste Erosionsindex immer bei dem gleichem Anlagenleistungsfaktor ( $\cos \phi = 0.82$ ) auftritt. Die Kontrolle des Anlagenleistungsfaktor ist für den Schmelzer einfach und leicht, deshalb ist es auf eine ganz einfache Weise möglich den Ofen auch nach der Einschmelzzeit wirtschaftlich zu führen.

Im nächsten Kapitel ist der Lichtbogenofen als Energieverbraucher dargestellt. Der Einfluss der betriebsmässigen Stromschwankungen auf die Netzbelastung ist durch die Makro und Mikrostabilität des Lichtbogens gegeben. Die Möglichkeiten und Ansprüche der Elektrodenregelung (Kraftregelung) von welcher der Betrieb des Ofens grösstenteils abhängt, sind erörtert. Die Leistungsschwankungen des Lichtbogens übertragen sich auf das Hoch-

spannungsnetz und rufen dort entsprechende Spannungsänderungen hervor die sich besonders auf die Glühlampen sehr störend auswirken können. Diese Störungen können voraus bestimmt werden, sie hängen aber vor allem von der Kurzschlussleistung des Netzes und von der Transformatorstärke ab.

Eine weitere Charakteristik des Lichtbogenofens als Energieverbraucher ist neben der nichtsymmetrischen Beanspruchungen und der höheren harmonischen Strömen vor allem in der ungleichmässigen Ausnützung der Kraft während der ganzen Schmelzzeit. Davon spricht der Belastungsfaktor, der Überbelastungsfaktor und der Belastungsfaktor der elektrischen Ofenanlagen. Diese Faktoren sind für einen Ofen so wie auch für eine Ofengruppe dargestellt. Es ist auch die Möglichkeit angedeutet wie den Belastungsfaktor einer Ofengruppe auszubessern beziehungsweise wie die Spitzenbelastung zu niedrigen.

Im letzten Kapitel werden die Leistungsparameter des Ofens besprochen. Es ist das Verhältniss zwischen der Transformatorleistung und der Stundenleistung des Ofens so wie zwischen der Wirkleistung während des Einschmelzens und der Einschmelzzeit gezeigt. Am interessantesten sind die Funktionen welche das Verhältniss zwischen der Ofenstundenleistung und dem spezifischen Energieverbrauch darstellen. Die gegebenen Kurven haben zwei Extremwerte: einen minimalen Energieverbrauch beim Betrieb mit einem maximalen Leistungsfaktor und eine maximale Stundenleistung beim Betrieb mit einer maximalen Kraft des Lichtbogens. Im einzelnen sind die Wärme und Elektrischen Verluste und die Energiebilanz des Lichtbogenofens beschrieben.

Für die Bestimmung der charakteristischen Ofendaten nötigen elektrischen Messungen sind am Ende dieses Kapitels beschrieben.

## SUMMARY

The paper consisting of three chapters shows the most important characteristics of an electric arc furnace for steel-making. The chapter Electrotechnical parameters of an electric arc furnace deals with electrical behavior of the device. Period of charge melting is discussed and possibilities for operation with the minimal specific energy consumption are analyzed. The paper gives evidence that melting with maximal power of the arc is more economical, as the operation takes only about 80 per cent of the time necessary for melting with the minimal energy consumption. Possibilities for the most economical operation are examined. The most important factor is the magnitude of furnace impedances and danger for overloading of the furnace transformer. The period of the molten charge demands completely different electrical conditions in the furnace: the arc works steadily, damper is not needed any more, energy input is essentially smaller. As arc radiates energy into the furnace, its geometry must be such that the radiation towards the furnace refractor will be the smallest. As geometry of the arc is determined by purely electrical dimensions, so called erosion index is defined, which was introduced by Mr. Schwabe, American researcher of electric arc furnaces. On the other hand, determination of such erosion index which should be a parameter for thermal load of the furnace refractory is unsuitable, as the index is only a number. The author proved that the maximal erosion index appears always at the same phase factor ( $\cos \phi = 0.82$ ). The control of the phase factor is for the smelter a very simple and easy task, and therefore the furnace can be economically controlled in a very simple way also during the time when charge is molten.

In the next chapter the furnace is shown as an electro-energetical consumer. Influence of every time consumption

of electrical energy on the feeder network is given by macro- and microstability of the electric arc. Possibilities and demands for electrode regulation (power regulation) are examined, because the furnace operation depends a great deal on this regulation. Advantage or disadvantage of the operation due to the magnitude of the network voltage drop (oscillating light of bulbs) can be determined beforehand. Circumstances depend mainly on short-circuit power of the electroenergetic system, and on the transformer power. A further characteristic of an electric arc furnace as an electroenergetic consumer is an unequal power consumption during the operating cycle, besides unsymmetrical loads and higher harmonic currents. This is confirmed by a load factor, by an overload factor, and by a load factor of the electric furnace devices. Factors for one furnace as well as for a group of furnaces are presented, and in this case, possibility is shown how to improve the load factor for a furnace group or how to decrease their peak load.

In the last chapter energy-producing parameters of the furnace are discussed. Correlations between the furnace transformer power and the furnace throughput rates, between the power during the melting period and the melting time and specific energy consumption, etc. are presented. The most interested and for exploitation the most suitable are those functions which show relationship between the furnace throughput and its specific heat consumption. The given curves has two extremes: a minimum energy consumption at operating with maximal efficiency, and a maximum of throughput at operating with the maximal arc power. Detailedly heat and electrical losses are dealt with, as well as the structure of energy balance for an electric arc furnace. To determine characteristic data of a furnace, which are basis for evaluation of operating conditions, some measurements are necessary, and they are shortly described at the end of the chapter.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В трех частях статьи приведены наиболее важные характеристики электродуговой печи для производства стали. В первой части о электрических параметрах рассмотрены электрические соотношения установки. Указано на длительность плавления и на возможности плавления с минимальной утратой специфичной теплоты. Доказывается, что плавление с максимальной мощностью на электрической дуге более экономно т. к. в сравнении с плавкой с минимальной утратой специфичной теплоты, оно длится всего прибл. 80 % времени. Рассмотрены возможности наиболее экономного производства. Самая важная особенность представляет величина полного сопротивления (импеданса) и допустимость перегрузки трансформатора печи. Время расплавления загрузки требует совсем иные электрические соотношения в печи: дуга горит спокойно, дроссель не нужен, подача электрической энергии существенно меньше. Вследствии свободной радиации дуги геометрическая конструкция дуги должна быть такова чтобы радиация на футеровку была чем меньше. Так как геометрию дуги определяют только электрические размеры то посредством их формулирован так именованный эрозийный индекс, его ввел американский исследователь электродуговых печей Mr. Schwobe. Несмотря на это, следить за этим индексом, который бы должен представлять размерный показатель, не рекомендуется, потому что представляет собой лишь годовое число.

М.Хпава

Афтор статьи доказывает, что максимальный эрозийный индекс наступает всегда при одинаковом факторе фаз (косинус  $\phi = 0.82$ ). Проверка фактора фаз для плавильника весьма проста. Поэтому есть возможность на весьма легкий способ руководить с электродуговой печью наиболее экономно также во время расплавления загрузки.

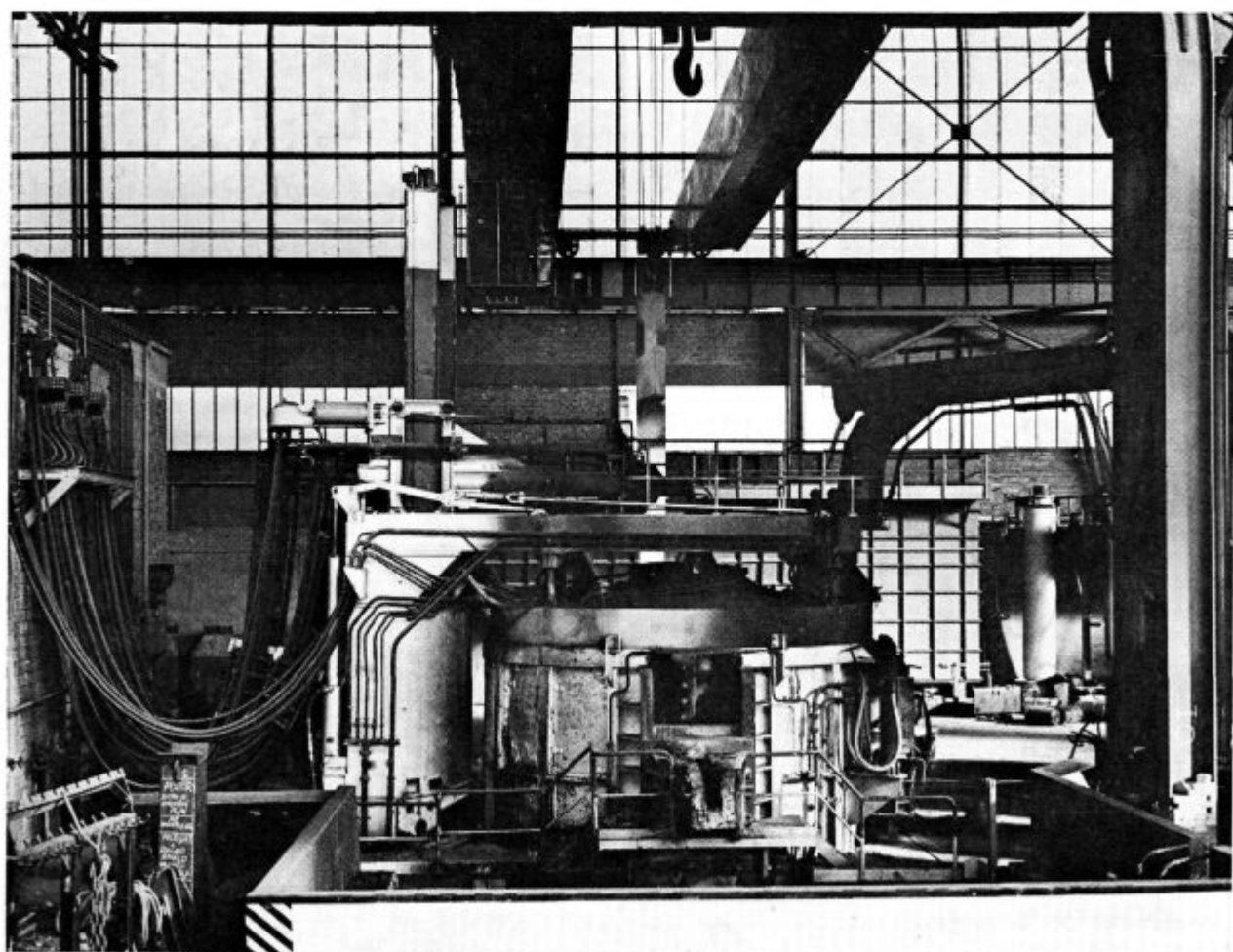
Во второй части статьи печь рассмотрена как электроэнергетический потребитель. Блияние каждого расхода электроэнергии на питающую сеть показано при помощи макро и микростабильности электрической дуги. Рассмотрены возможности и требо-

вания регуляции электрод (регуляция мощности) от чего главным образом зависит режим работы печи. Положительная и отрицательная стороны режима работы печи в зависимости от величины изменения напряжения сети (пульсирование электрических лампочек) можно определить вперед, условия режима зависят главным образом от короткозамкнутости мощности электроэнергетической системы и от мощности трансформатора. Следующая характеристика электродуговой печи как электроэнергетического потребителя кроме несимметрических напряжений и высших гармонических электр. токов состоит в неравномерности потребления ёмкости во время рабочего цикла. На это указывают: фактор нагрузки, фактор перегрузки и фактор нагрузки электрического снаряжения печи. Рассмотрены факторы одной и одной группы печей при чём указано на возможность как улучшить фактор загрузки целой группы печей т. е. как уменьшать ихнюю пиковую загрузку.

В последней части статьи рассмотрены энергетические параметры производительности печи. Указано на соотношение между мощностью трансформатора и производства электродуговой печи в час; между мощностью во время плавки и длительности плавки т. е. расхода удельной энергии итд. Самое интересное и наиболее применимо в эксплуатации суть функции которые указывают на связь между производительностью печи и расхода удельной энергии.

Приведены кривые линии которые имеют два экстремума: минимальный расход электрической энергии при режиме работы печи с максимальным использованием и кривая максимальной производительности во время хода с максимальной мощностью дуги.

Обширно рассмотрены тепловые и электрические потери и конструкция энергетического баланса эл-дуговой печи. В конце статьи описаны измерения необходимые для определения характеристических данных которая служат како основание для расчёта режима работы электродуговой печи.



Nova 40 t. električna peč Birlec v Zelezarni Ravne — Foto: Exportprojekt - Ljubljana

## Vpliv nekaterih faktorjev lastnosti snovi na termograme, dobljene pri diferencialni termični analizi

Diferenčno termično analizo lahko pod določenimi pogoji uporabljamo kot dinamični kalorimeter za določanje reakcijskih toplot fizikalnih in kemičnih procesov. Vendar vpliva na njeno reproduktivnost vrsta faktorjev, ki jih z natančnim delom lahko obvladamo. O vplivu nekaterih od teh faktorjev poroča tudi naše delo. Članek obravnava vpliv hitrosti ogrevanja snovi na temperaturo, velikost in lego odklona od ničelne črte, vpliv velikosti zrna ter oceno natančnosti določanja reakcijskih toplot za razkroj karbonatov in zgorevanja trdnih goriv.

Diferenčna termična analiza dobiva v novejšem času vse večje področje uporabnosti. Navedli bomo samo nekatere od domačih raziskav o uporabnosti DTA, ki smo jih izvedli z namenom, da ugotovimo v kakšni meri se da ta analiza uporabiti za zasledovanje fizikalnih in kemičnih procesov, predvsem njihovih energetskih sprememb in kinetike njihovega poteka.

Raziskave so pokazale, da se pod določenimi pogoji da diferenčna termična analiza uporabiti kot dinamični kalorimeter pri preiskavi binarnih kovinskih sistemov, da pa raziskave procesov v snoveh v prašnatem stanju še niso prešle iz faze semikvantitativne analize. Problemi v zvezi z aplikacijo analize za te vrste procesov so neprimerno težji kot pri delu s kovinami. Predvsem je treba poudariti relativno slabo reproduktivnost rezultatov, ki nastaja kot posledica spremembe fizikalnih lastnosti med procesom, kot so npr. nasipna teža, granulacija, poroznost, temperaturna prevodnost itd. Zato je glavni problem pri preiskavah te vrste snovi prilagoditev reakcijskega prostora pričakovanim kemičnim in fizikalnim spremembam med procesom. Tako npr. ni vseeno ako preizkušane nasujemo na konico termoelementa, ali pa ga stisnemo v briket. Namen tega poročila je, da opozori na vpliv nekaterih lastnosti preizkušanca na lego termograma in na velikost ploščine pod njim.

Ploščina pod termogramom, t. j. med ničelno črto in krivuljo DTA, je med drugim odvisna od geometrične oblike vzorca, ki ga preiskujemo ter geometrične oblike celotnega sistema, predvsem pa bloka v katerem sta vzorec in primerjalna snov. Tu mislimo na simetrično lego ladjic z ozirom na

os peči, v kateri ogrevamo vzorec in primerjalno snov. Ladjici naj bosta enako veliki, imata naj enako obliko, da se čim bolj približamo enakim pogojem za temperaturni prenos od sten peči do preizkušanca. Prav tako naj bi se primerjalna snov po toplotni kapaciteti in toplotni prevodnosti bistveno ne razlikovala od istih lastnosti preizkušancev.

V enačbi diferencialno termične analize:

$$m \Delta H = g K_s \int_a^b y dt$$

kjer so:

$m$  — masa snovi, ki med reakcijo reagira,  
 $\Delta H$  — reakcijska toplota na gram  
 $g$  — konstanta v zvezi z geometrično obliko  
 $K_s$  — toplotna prevodnost preizkušanca in  
 $y dt$  — površina pod termogramom DTA  
 $a$  in  $b$  — začetek in konec reakcije,  
sta odločilni konstanti  $g$  in  $K_s$ .

V raziskovalni tehniki je težko zagotoviti, da bi prašnata snov, ki jo preiskujemo in snov ki jo uporabljamo za primerjalne snovi, istočasno imeli enaki toplotni prevodnosti, enaki specifični toploti, enaki masi, enaka volumna ter enaki geometrijski konstanti<sup>1)</sup>. Poleg tega se navedene lastnosti snovi med procesom spreminjajo, kar lahko povzroča odklone od ničelne črte, ki zavajajo raziskovalca pri ocenjevanju krivulje DTA. Do določene natančnosti lahko med procesom držimo le enaka volumna in geometrično obliko, ki sta odvisna pri preiskavi prašnatih snovi predvsem od oblike reakcijskega prostora.

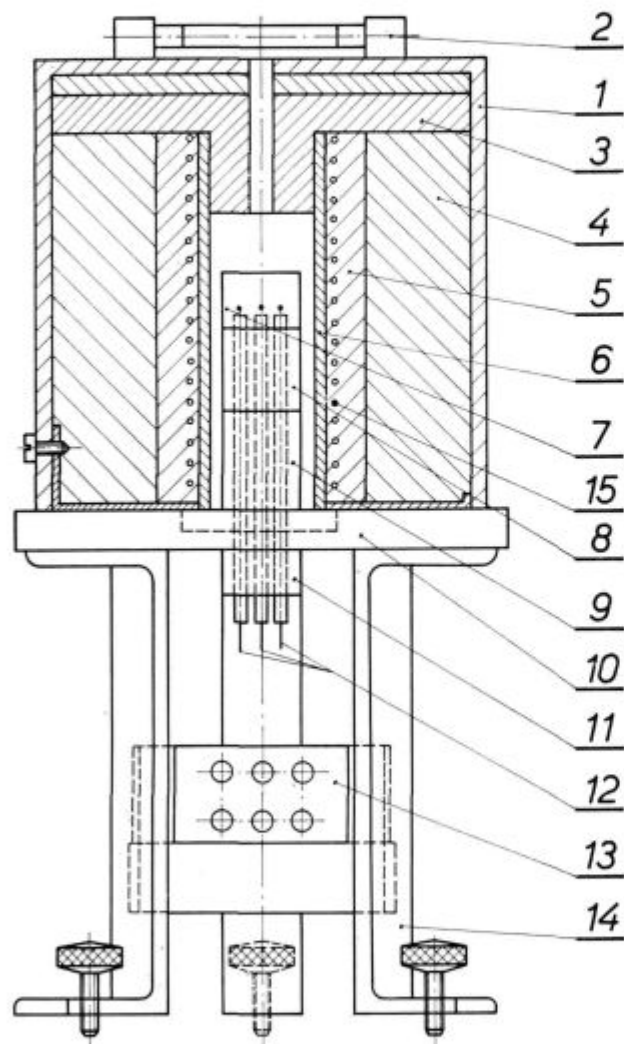
Poleg oblike preizkušanca vpliva na velikost ploščine pod termogramom tudi njegova masa. V skladu z enačbo kvantitativne DTA, je površina pod termogramom premo sorazmerna reakcijski toploti, t. j. produktu iz mase preizkušanca in reakcijske toplote na enoto mase.  $g$  in  $K_s$  sta v enačbi konstanti. Tako obstoja možnost, da se pri spreminjanju mase preizkušanca med procesom površina pod termogramom spreminja, ker se spreminja z maso tudi faktor  $g$ . V tem primeru moramo aparaturo umeriti z različnimi masami preizkušancev.

Tudi kljub zelo bogatem eksperimentalnem delu številnih raziskovalcev še danes ni zanesljive



teoretične enačbe, ki bi reševala kvantitativno omenjene probleme. V naslednjih poglavjih navajamo številne faktorje, ki vplivajo na natančnost meritev z DTA. Predvsem se bomo omejili na zunanje faktorje, ki jih lahko odpravimo s skrbnim delom ali pa z avtomatizacijo naprave in tako dosežemo zadovoljivo reproduktivnost rezultatov.

V termografski praksi je več načinov merjenja in prikazovanja razlik med preizkušancem in primerjalno snovjo. Obravnavali bomo dva načina, ki sta v literaturi najbolj pogosta, t. j. risanje termogramov v koordinatah temperaturna razlika med preizkušancem in primerjalno snovjo ( $\Delta T$ ) in temperaturo primerjalne snovi ( $T$ ), ter temperaturno razliko med preizkušancem in primerjalno snovjo ( $\Delta T$ ) ter časom ( $t$ ).



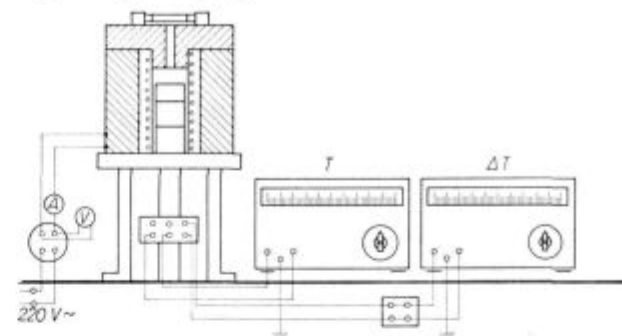
Slika 1  
Shema celotne naprave za DTA

Shema aparature, na kateri smo izvajali DTA, je na slikah 1 in 2.

Posamezne oznake pomenijo:

1. ohišje peči, 2. ročica, 3. porozna šamota, 4. žilindrina volna, 5. šamotni zdrob, 6. keramična cev, 7.

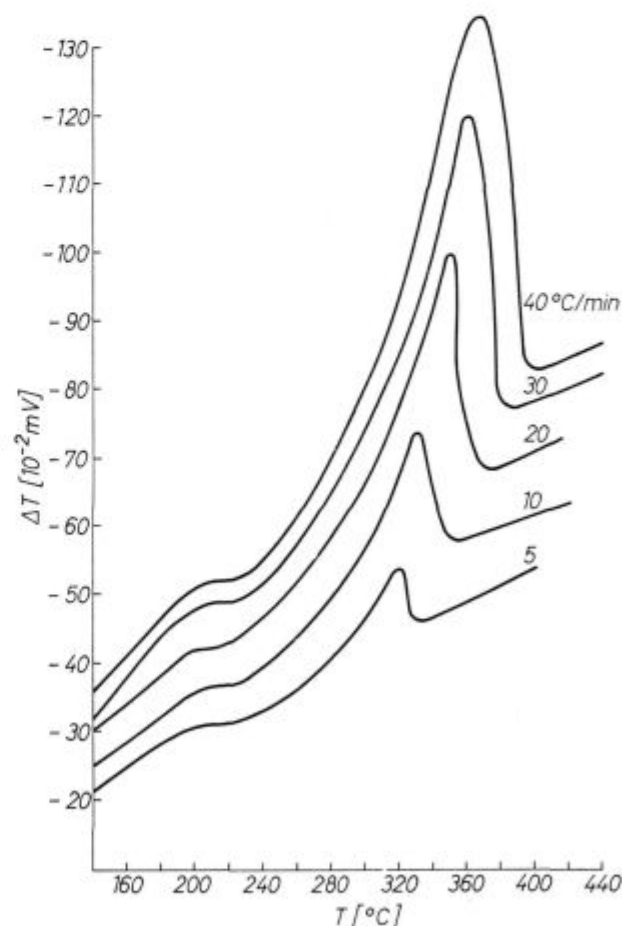
blok iz niklja, 8. nikljev podporni blok, 9. litoželezno držalo, 10. ploščica iz litega železa, 11. litoželezni vložek, 12. termoelement, 13. priključna ploščica, 14. podstavek za peč, 15. električno navitje za ogrevanje peči.



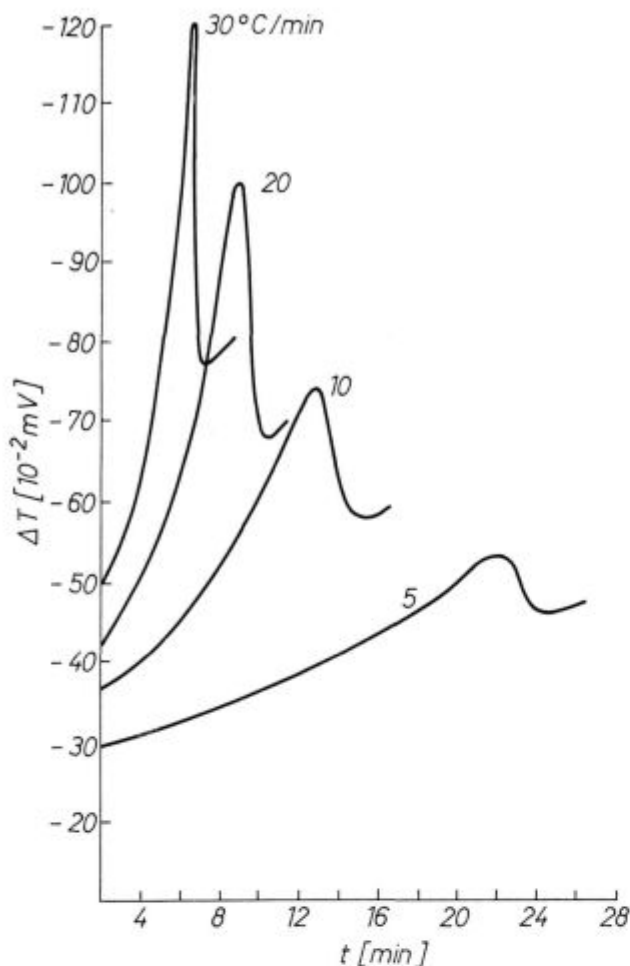
Slika 2  
Shema ogrevne peči za DTA s termoelementi in reakcijskim prostorom

### VPLIV HITROSTI OGREVANJA PREIZKUSANCA

Zasledovali smo vpliv hitrosti ogrevanja na velikost in obliko odklona od ničelne črte. Zaradi



Slika 3  
Termogram razkroja  $\text{CdCO}_3$  v koordinatah  $\Delta T/T$  za različne hitrosti ogrevanja



Slika 4  
Termogram razkroja  $\text{CdCO}_3$  v koordinatah  $\Delta T/t$  za različne hitrosti ogrevanja

enostavnosti smo za oceno te odvisnosti izbrali reakcijo razkroja kadmijevega karbonata  $\text{CdCO}_3$  t. j. proces, za katerega moramo v reakcijski prostor dovajati toploto zaradi endotermne reakcije ter zgorevanje petrolkoksa t. j. relativno čistega trdnega goriva z analizo: 1,71 % vlage, 3,36 % hlapnega, 0,81 % pepela, 94,12 %  $C_{\text{fix}}$ , kot proces, pri katerem se razvija toplota.

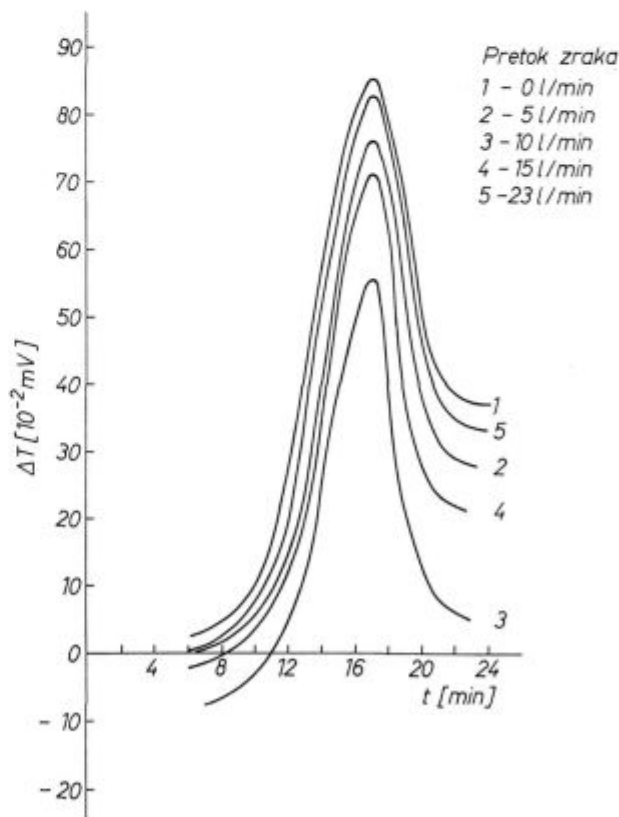
Pri razkroju  $\text{CdCO}_3$  nastajata le  $\text{CdO}$  in  $\text{CO}_2$  in kaže zato termogram en sam izrazit minimum (minimum zato, ker nanašamo endotermne procese v negativno smer). Da bi čim bolj eliminirali faktorje, ki so odvisni od snovi same (predvsem razliko med temperaturno prevodnostjo  $\text{CdCO}_3$  in  $\text{CdO}$  ter med gostotama snovi pred in po reakciji), smo izbrali relativno majhno maso preizkušancev. Ta je bila 50 mg.  $\text{CdCO}_3$  je bil kemično čist (firme Riedel de Haen). Termogrami za  $\text{CdCO}_3$  so podani na slikah 3 in 4. Sliki kažeta odvisnost oblike termograma in ploščine pod termogramom od hitrosti ogrevanja pečice. Izbrali smo hitrosti 5, 10, 20,

30 in 40° C v minuti, ki jih razni avtorji običajno uporabljajo pri izvajanju DTA.

Termogrami so narisani v koordinatah  $\Delta T/T$  in  $\Delta T/t$ . Diagrami kažejo, da se temperatura začetka razkroja pri različnih hitrostih ogrevanja ne spremeni.  $\text{CdCO}_3$  se je začel razkrajati pri vseh hitrostih ogrevanja pri 220° C, dočim se je maksimum odklona pomaknil z naraščajočo temperaturo proti višjim temperaturam.

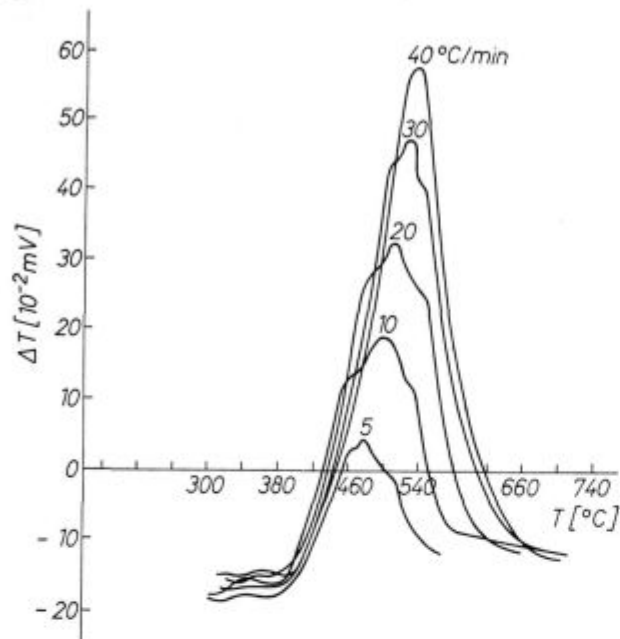
Slika 4 kaže na drugi strani, da se v koordinatah  $\Delta T/t$  oblike krivulj za različne hitrosti ogrevanja med seboj močno razlikujejo, da pa so ploščine pod termogrami praktično enake. To pomeni, da moramo za kvantitativno DTA uporabljati drugi način beleženja rezultatov. Ta način je bolj prikladen zato, ker v teh koordinatah ploščina ni odvisna od napak, ki bi nastale zaradi neenakomernega ogrevanja.

Pri poskusih zgorevanja smo najprej ugotovili ali zadostuje količina zraka, ki se nahaja v peči (t. j. v reakcijskem prostoru) za popolno zgoretje 2 mg petrolkoksa. Poskusi so pokazali, da ta količina zraka zadostuje. To kaže slika 5, ki daje odvisnost velikosti odklona od ničelne črte od količine vpihanega zraka. Količine smo menjavali od 0 do 23 litrov/min. Diagram namreč kaže, da je v vseh primerih ploščina pod termogrami enaka in da količina zraka v reakcijskem prostoru zadostuje.



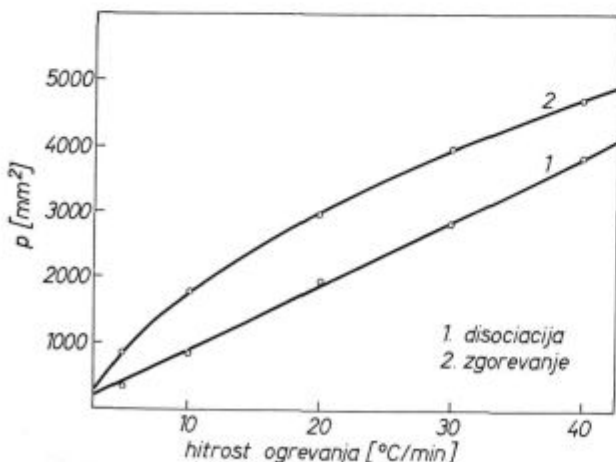
Slika 5  
Odvisnost velikosti odklona od količine vpihanega zraka

Rezultate, ki jih je dala DTA zgorevanja petrolkokska na zraku, kaže slika 6. Tudi v tem primeru temperatura začetka zgorevanja ni odvisna od hitrosti ogrevanja, pač pa so višine odklonov in ploščine pod termogrami pri večjih hitrostih ogrevanja večje. To velja seveda zopet za termograme, risane v koordinatah  $\Delta T/T$ .



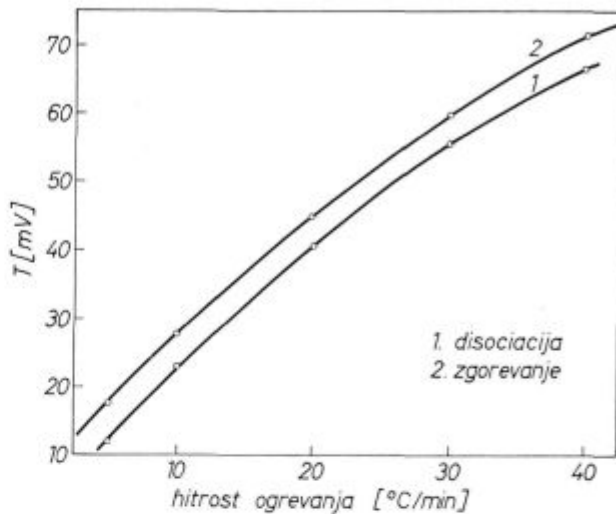
Slika 6  
Termogrami zgorevanja polkokska v odvisnosti od hitrosti ogrevanja

Naslednja slika 7 kaže odvisnost ploščine pod termogramom od hitrosti ogrevanja v koordinatah  $\Delta T/T$  za disociacijo  $\text{CdCO}_3$  in zgorevanje petrolkokska. Dočim smo za razkroj karbonata dobili linearno odvisnost, smo dobili pri zgorevanju petrolkokska krivuljo, ki kaže na odvisnost višjega reda. Poleg tega kaže krivulja 2 na sliki, da je za kvantitativno delo potrebna hitrost ogrevanja najmanj  $20^\circ \text{C}$  v minuti.



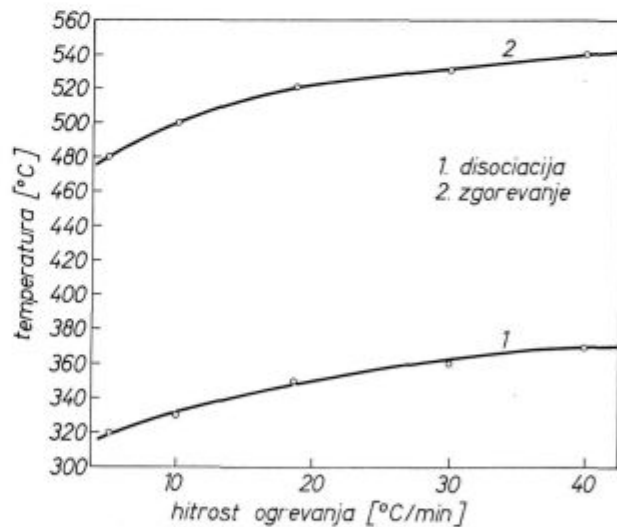
Slika 7  
Odvisnost ploščine pod termogramom od hitrosti ogrevanja

Z naraščajočo hitrostjo ogrevanja narašča v obeh primerih tudi višina odklona od ničelne črte, oziroma razlika med temperaturama preizkušanca in primerjalne snovi. Velikost povišanja maksimalnega odklona je v obeh primerih enaka (naklonski kot je enak). (Slika 8).



Slika 8  
Odvisnost velikosti maksimalnega odklona od hitrosti ogrevanja

Druga posledica različnih hitrosti ogrevanja je, da se pri povečanju hitrosti ogrevanja pomakne maksimum odklona proti višjim temperaturam. To kaže slika 9.



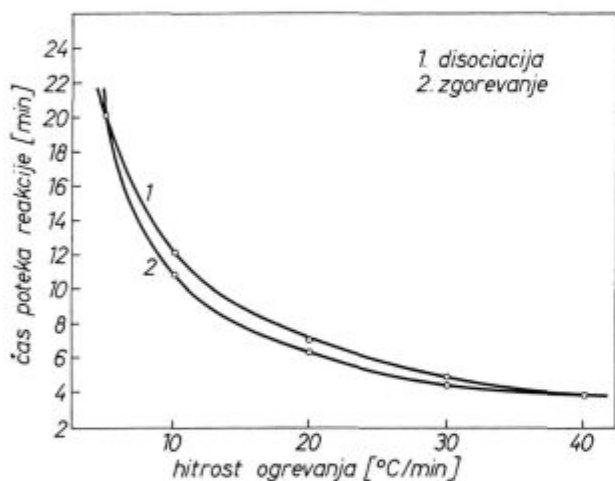
Slika 9  
Odvisnost pomika maksimuma odklona k višjim temperaturam od hitrosti ogrevanja

Hitrejšje dovajanje toplote v reakcijski prostor povzroča, da potekajo reakcije hitreje, da se v enoti časa razvije, oziroma porabi (v primeru razkroja) več toplote, kot pri počasnejšem dovajanju toplote. Vendar pa zaradi inercije pride do zakasnitve toplotnega impulza na termoelement, ki za-

znamuje zato temperaturo maksimalnega odklona pri višjih temperaturah. Poleg tega verjetno pri visokih hitrostih ogrevanja reakcijske hitrosti niso tako velike, da bi sledile dviganju temperature preizkušanca in se zato zaključijo šele pri višjih temperaturah. Zato je dokaj pomembno, da hitrosti reakcije prilagodimo tudi hitrost ogrevanja preizkušanca, ker se nam sicer lahko zgodi, da dobimo napačne podatke za temperature, pri katerih je potekala reakcija. Prevelika hitrost nam lahko tudi tako zabriše možne sekundarne procese, da jih ne moremo z gotovostjo registrirati. Odkloni od ničelne črte se lahko med seboj prekrijejo. Pripomniti pa je treba, da je DTA dinamična analiza, ki daje običajno posebno pri snoveh v prašnatem stanju nekoliko višje temperature za poteke reakcij kot klasične statične ravnotežne metode.

### POVPREČNA REAKCIJSKA HITROST IN HITROST OGREVANJA

Čas razpada  $\text{CdCO}_3$  in zgorevanja petrolkoka, ki ga odčitamo tako, da vzamemo začetek odklona od ničelne črte za začetek reakcije in konec reakcije, ko se krivulja vrne na ničelno črto prikazuje v odvisnosti od hitrosti ogrevanja slika 10.



Slika 10

Odvisnost trajanja reakcije od hitrosti ogrevanja

Na naslednji sliki (slika 11) pa dobimo linear- no odvisnost med hitrostjo ogrevanja in povprečno hitrostjo razkroja ter zgorevanja.

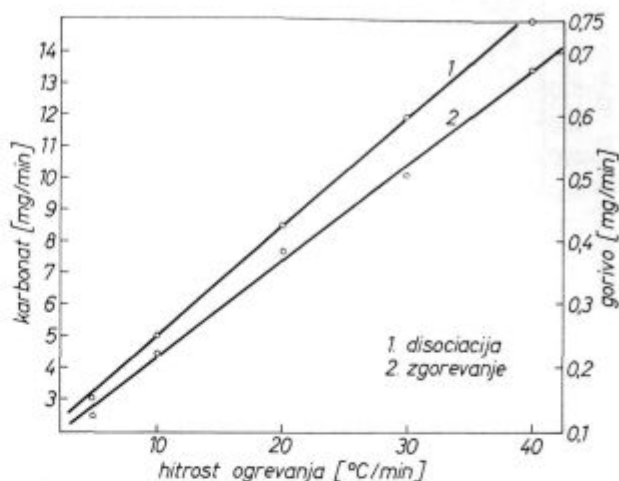
Povprečno hitrost za oba tipa reakcij smo do- bili tako, da smo delili maso preizkušanca s časom, potrebnim za razkroj, oziroma zgorevanje.

### VPLIV VELIKOSTI ZRNA NA ZGOREVANJE PETROLKOKSA

Poskusi so pokazali, da na obliko termograma vpliva tudi velikost zrna. V ta namen smo zdrobili petrolkoks na frakcije: pod 0,04 mm; med 0,04 ...

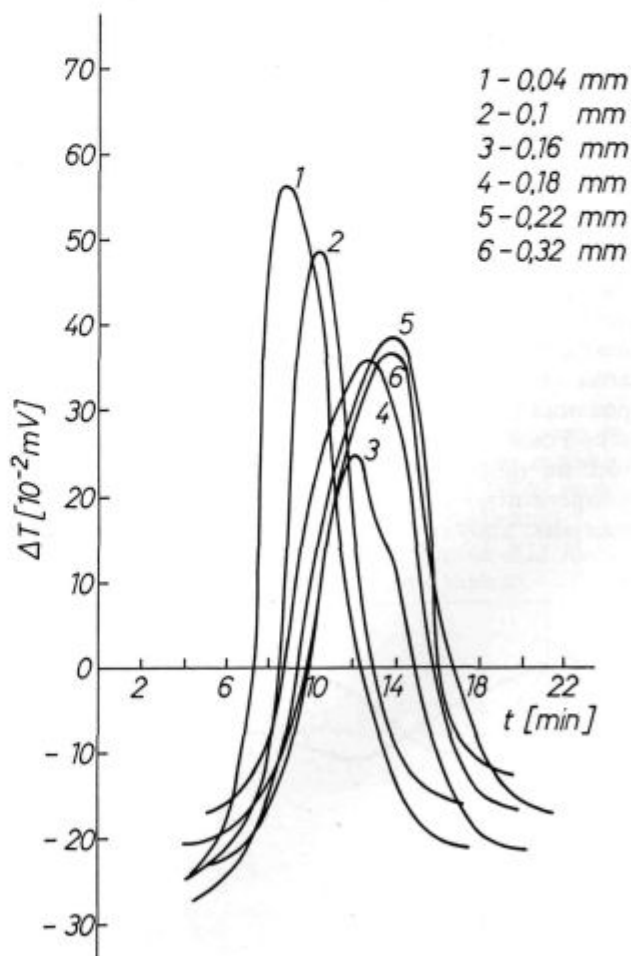
... 0,1 mm, 0,1 ... 0,16 mm, 0,16 ... 0,18 mm, 0,18 ... 0,22 mm, 0,22 ... 0,32 mm.

Ostali pogoji so ostali enaki kot pri prejšnjih serijah poskusov, le da smo preizkušance ogrevali s hitrostjo z 20° C v minuti.



Slika 11

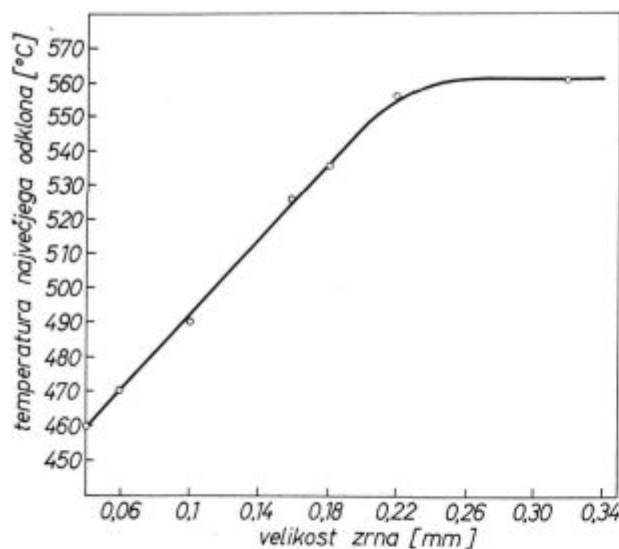
Odvisnost povprečne hitrosti reakcije od hitrosti ogrevanja



Slika 12

Naraščanje temperature maksimalnega odklona pri povečanju velikosti zrna preizkušanca

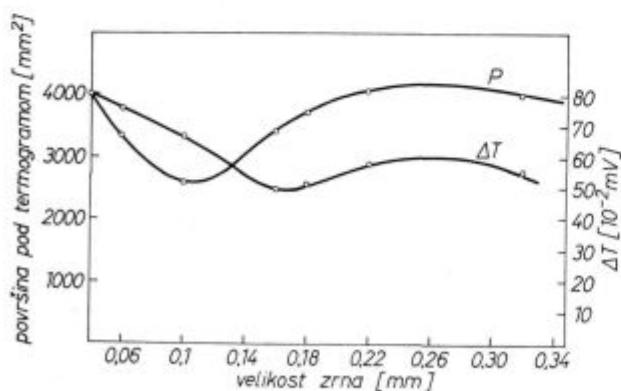




Slika 13

Odvisnost temperature maksimalnega odklona od zrnatosti preizkušanca

Rezultate poskusov o vplivu velikosti zrna na temperaturo začetka reakcije, kažeta sliki 12 in 13. Slika 13 podaja odvisnost med temperaturo maksimalnega odklona in velikostjo zrna, slika 12 pa vpliv velikosti zrna na razlike temperatur med preizkušancem in primerjalno snovjo. Pri manjšem zrnu začne potekati reakcija pri nižjih temperaturah, kot pri večjem zrnu (slika 12), prav tako se z večanjem zrna maksimum termograma pomakne proti višjim temperaturah. Zgorevanje je zaradi relativno manjših površin pri večjih zrnih počasnejše, kot pri manjših zrnih. Za kvantitativno delo je važna ugotovitev, da temperatura maksimalnega odklona narašča z naraščajočo velikostjo zrna (slika 13). Ta namreč kaže, da moramo za posamezne vrste preiskav skrbno izbrati velikost zrn. Poskusi so pokazali, da vpliva velikost zrna tudi na velikost ploščine pod termogramom in na temperaturno razliko med preizkušancem in primerjalno snovjo (slika 14).

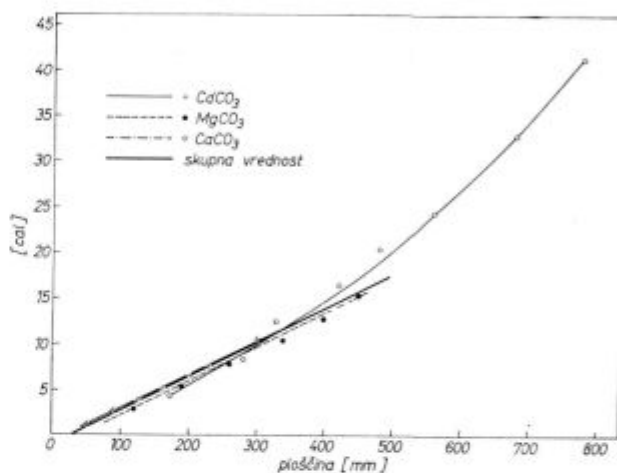


Slika 14

Odvisnost velikosti površine termogramov od zrnatosti preizkušanca

## OCENA NATANČNOSTI DTA

DTA je primerjalna metoda, kar pomeni, da pri njej primerjamo temperaturo preizkušanca in primerjalne snovi. Zato moramo pred poskusi vsako aparaturo umeriti, če hočemo delati zanesljivo in kvantitativno. Natančnost aparature, ki smo jo uporabili za naše poskuse, smo ugotavljali s termogrami za različne karbonate in sicer  $\text{CdCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$  in  $\text{CaCO}_3$ . Za te tri karbonate smo se odločili predvsem zato, da bi umerili aparaturo v širokem temperaturnem območju med  $250^\circ$  do  $920^\circ \text{C}$ , t. j. od temperature razkroja kadmijevega do temperature razkroja kalcijevega karbonata. Poskuse s  $\text{CaCO}_3$  smo izvedli z masami, ki odgovarjajo porabi toplote za razkroj od 5 do 40 kalorij. Rezultate teh poskusov smo prikazali na sliki 15. Krivulja, ki je



Slika 15

Umeritvene krivulje za endotermne reakcije

srednja vrednost petih paralelek, ne daje po vsem področju linearne odvisnosti ploščine pod termogramom od toplote potrebne za razkroj. Pri delu z  $\text{MgCO}_3$  so bili izvedeni poskusi na področju od 3 do 15 kalorij. Srednje vrednosti rezultatov teh poskusov so označene s trikotniki na sliki 15. Ker tudi v tem primeru nismo dobili popolnega linearne odnosa, smo se v naslednjih serijah pri razkroju  $\text{CdCO}_3$  odločili še za ožje območje razkrojnih toplot, za toplote le do 10 kalorij. Rezultate kažejo na sliki 15 točke, označene z križki. Tokrat smo dobili linearni odnos. Rezultate vseh treh serij poskusov lahko prikažemo v obliki enačbe:

$$Q = A \cdot P^2 + B$$

kjer so:

- Q — reakcijska toplota (cal),
- A — konstanta,
- P — površina pod termogramom ( $\text{cm}^2$ ),
- B — konstanta.

Iz eksperimentalnih podatkov izračunane konstante A in B za DTA razkroja  $\text{CdCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$  in  $\text{CaCO}_3$  podajamo v naslednji tabeli:

Tabela 1

karbonat	$Q_1$	$P_1$	$P_1^2$	$Q_2$	$P_2$	$P_2^2$	$Q$	$P^2$	A	B	maks. nap. $\frac{0}{0}$ $P_1^2$
CaCO <sub>3</sub>	41	7,80	60,8	4,23	1,74	3,03	36,77	57,5	0,64	2,0	6,9
MgCO <sub>3</sub>	15,4	4,50	20,2	2,70	1,16	1,3	12,70	18,9	0,67	1,8	4,5
CdCO <sub>3</sub>	10,8	3,03	9,12	1,28	0,50	0,25	9,25	8,87	1,08	0,9	8,6

Vsak posamezni karbonat ima karakteristične vrednosti konstant A in B, ki ju moramo uvrstiti v zgornjo enačbo, če želimo iz površine pod termogramom P izračunati reakcijsko toploto Q, oziroma maso karbonata.

Če se pri delu omejimo na manjše zatehte tako, da reakcijska toplota ne presega vrednost 10 cal, lahko v našem primeru gornjo enačbo zamenjamo z linearno enačbo, ki velja za vse tri preiskane karbonate:

$$Q = k \cdot P - n$$

Vrednosti konstant k in n sta 3,75 ter 0,7. Maksimalna napaka raste s povečanjem mase tako, da je na zgornji meji veljavnosti ( $Q = 10$  cal) okrog 12 %. To pomeni, da poenostavljena enačba daje sicer zadovoljive rezultate za rutinsko delo (bolje le za oceno reakcijskih toplot), dočim se moramo za natančno določanje poslužiti prvotne enačbe.

## ZAKLJUČKI

Aparatura, ki jo kaže slika 2, omogoča kvalitativno ocenjevanje v preprostih primerih, pa tudi kvantitativno določanje reakcijskih toplot. Ker se v primerih, ko poteka več procesov istočasno, reakcijske toplote med seboj seštevajo in se zato ploščine med seboj deloma ali pa popolnoma prekrivajo, je kvalitativno delo omejeno le na sumarno reakcijsko toploto. Pri tem vplivajo na velikost ploščine fizikalne in kemične lastnosti snovi, ki jih preiskujemo ter zunanji faktorji, ki so odvisni predvsem od pogojev izvajanja DTA same. Od teh faktorjev smo preiskali vpliv hitrosti ogrevanja na velikost in obliko odklona od ničelne črte, za kar smo uporabili reakcijo razkroja CdCO<sub>3</sub> in zgorevanje petrolkoka. Poskusi so pokazali, da začetek

reakcije ni odvisen od hitrosti ogrevanja. Za kvantitativno analizo moramo termograme nanašati v koordinatah  $\Delta T/t$ . Maksimum odklona se z naraščajočo hitrostjo ogrevanja pomakne proti višjim temperaturam. Prevelika hitrost ogrevanja lahko povzroči, da se nekateri odkloni na termogramu prekrivajo, in zato ne moremo ločiti med seboj posameznih procesov med reakcijo. Med povprečno hitrostjo razkroja in zgorevanja ter hitrostjo ogrevanja smo ugotovili linearno odvisnost. Pri manjšem zrnu začne potekati reakcija pri nižjih temperaturah kot pri večjem zrnu. Bolj zdrobljeni vzorci dajejo zato nižje vrednosti za temperature začetka reakcije, kot vzorci z bolj grobimi zrni. To pomeni, da moramo za posamezne vrste preiskav skrbno izbrati optimalno velikost zrna. Da bi lahko izvajali poskuse DTA tudi kvantitativno, smo aparaturo umerili s snovmi z znanimi reakcijskimi toplotami. Med reakcijsko toploto in ploščino pod termogramom se za aparaturo prikazano na slikah 1 in 2, pri manjših zatehtah (do 10 cal) lahko poslužimo linearne enačbe:

$$Q = 3,75 \cdot P + 0,7 \text{ (cal)}$$

Natančnost, oziroma maksimalna napaka, ki smo jo dobili s to enačbo, je 12 %, dočim moramo za natančnejše delo uporabiti drugo enačbo:

$$Q = A \cdot P^2 + B.$$

Enačba velja seveda le za aparaturo, ki smo jo uporabljali za naše poskuse in mora zato raziskovalec, ki hoče raziskovati s pomočjo DTA, svojo aparaturo umeriti, preden začne z analizami.

Raziskave je omogočil Sklad Borisa Kidriča v Ljubljani, ki se mu iskreno zahvaljujemo.

## Literatura

1. Analiza fizikalnih parametrov preizkušanca na vrednost konstante  $gK_s - B$ . Dobovišek, N. Smajić, RMZ, Ljubljana, 1961, 2, 161–174.

## ZUSAMMENFASSUNG

Die differentiale thermische Analyse kann unter gewissen Bedingungen als dynamischer Kalorimeter für die Bestimmung der Reaktionswärme physikalischer und chemischer Prozesse gebraucht werden. Die Reproduzierbarkeit ist jedoch von verschiedenen Faktoren beeinflusst, welche aber mit einer genaueren Arbeit bewältigt werden können. Vom Einfluss einiger Faktoren berichtet auch

diese Arbeit. Im Artikel wird der Einfluss der Erwärmungsgeschwindigkeit der Materialien, die Größe und Lage des Ausschlags von der Nulllinie, der Einfluss der Korngröße und die Bewertung der Bestimmungsgenauigkeit der Reaktionswärme bei der Dissoziation der Karbonate und beim Verbrennen der festen Brennstoffe behandelt.

## SUMMARY

Differential thermal analysis can be used under certain conditions as a dynamic calorimeter for determination of reaction heats in physical and chemical processes. But its reproducibility is influenced by parameters which can be controlled by accurate work. This work reports about the influence of some of these parameters. The paper treats

the influence of the heating rate of samples, the magnitude and the position of deviations from the base line, the influence of the grain size, and estimation of accuracy in determination of reaction heats for decomposition of carbonates and for combustion of solid fuels.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дифференциальный термический анализ можно, при определенных условиях определения реактивной теплоты физических и химических процессов, употребить как динамический калориметр. На его воспроизведение влияют целый ряд факторов которые при точной работе можно элиминировать. В статье приведены некоторые из этих факторов.

Рассмотрено также влияние быстроты нагрева вещества на температуру, величина и положение отклонения от нулевого положения, влияние величины зёрен и оценка точности определения реактивной теплоты разложения карбонатов и сгорания твердых топлив.

## Termomehanična predelava jekla

Članek prinaša analizo bibliografije o termomehanični predelavi jekla in opis lastnih preizkusov o vplivu termomehanične predelave na mehanske lastnosti v vročem jekla z 0,3 % C, 2,9 % Si in 7,6 % Cr.

### UVOD

Po zelo splošni definiciji je termomehanična predelava jekla »uporaba deformacije pred aloptropno transformacijo jekla z namenom, da dobimo kovino, ki ima boljše mehanske karakteristike«. Več je postopkov, ki ustrezajo tej definiciji. Razdelimo jih v dve grupi: termomehanična predelava pri visokih temperaturah, angleško hot — cold working (v nadaljevanju teksta TMPVT) in termomehanična predelava pri nizkih temperaturah, angleško »ausforming« (v nadaljevanju teksta TMPNT).

Pri obeh postopkih deformiramo avstenit tako, da ne more rekristalizirati ali rekristalizira le omejeno in predno se transformira v strukturne sestavine jekla, ki so obstojne pri nizki temperaturi. TMPVT izvršimo pri visokih temperaturah, pri katerih je avstenit stabilen, zato jo lahko uporabljamo pri praktično vseh jeklih in brez znatnih sprememb v tehnologijo valjanja. Potrebno je le določiti optimalne parametre: redukcijo, končno temperaturo valjanja in način ohlajanja. TMPNT izvršimo pri nižjih temperaturah, pri katerih je avstenit metastabilen. Za ta postopek so torej primerna jekla, ki imajo v izotermnem in kontinuirnem TT diagramu zadosti veliko področje metastabilnega avstenita, da je mogoče predelavo izvršiti pred začetkom perlitne ali bainitne transformacije.

Po predelavi je potrebno jeklo ohladiti tako, da se ves avstenit spremeni v martenzit. Perlitna in bainitna premena zmanjšata trdnost jekla, ne da bi ustrezno povečala njegovo plastičnost. TMP občutno poboljša trdnostne lastnosti jekel, poveča popuščno obstojnost, utripno trdnost in obstojnost proti obrabi ter toplotnim udarom. Ne poveča trdote jekla, pač pa da martenzitni strukturi plastičnost, ki prepreči nastanek krhkega preloma brez deformacije ter pride tako do izraza naravna trdnost martenzita.

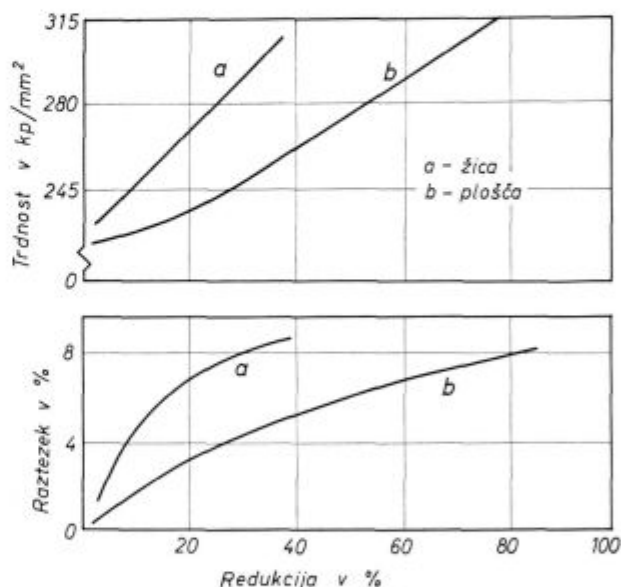
V strokovnem tisku je zelo veliko vjrov o TMP jekla, samo med leti 1960 in 1965 je bilo približno 200 člankov (Duckworth in Taylor 2). V tem članku smo se omejili na analizo izbranih dosegljivih publikacij, ki so izšle po letu 1962. Popolne

bibliografije o TMP jekla ne bi mogli dati tudi če bi analizirali mnogo več člankov, kajti članke o tem postopku stalno objavljajo strokovni časopisi. V članku smo na kratko rezimirali tudi rezultate naših preizkusov o vplivu TMP na mehanske lastnosti kromovega jekla v vročem.

### 1. PARAMETRI TMP

#### 1.1. Parametri TMPNT

Osnovni parametri so stopnja in temperatura predelave ter ohlajanje jekla po predelavi. Matas, Hill in Hunger (1) so ugotovili, da raste natezna trdnost jekla približno sorazmerno s stopnjo predelave (slika 1) in da je predelava z vlečenjem bolj učinkovita od predelave z valjanjem. Ta raz-



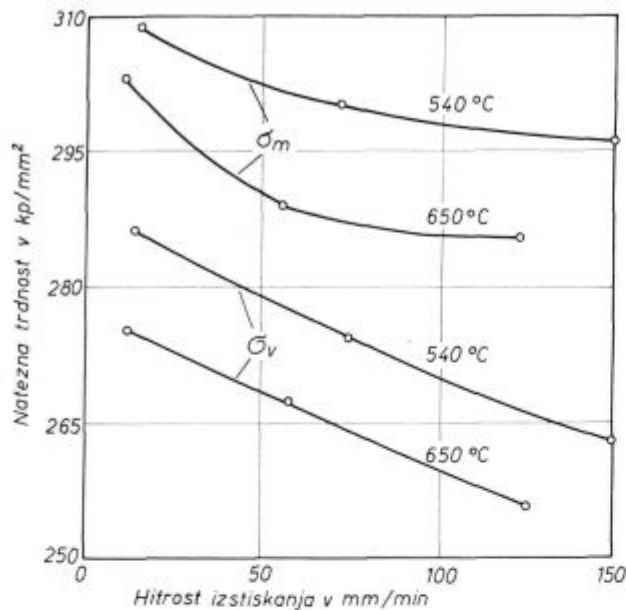
Slika 1

Vpliv termomehanične predelave z vlečenjem in z valjanjem na trdnost in raztezno jekla z 0,6 % C in 5,0 % Ni. Temperature vlečenja 425 °C, temperatura valjanja 425 do 540 °C, kaljeno s temperature predelave in 2 uri žarjeno pri 110 °C.

loček verjetno lahko pripišemo razločku v realni stopnji pregnetenja, ki je posledica razlik v toku materiala pri odprtem in zaprtim kalibru in katerega geometrično definirana stopnja redukcije ne zajame. Duckworth in Taylor (2) navajata, da se poveča trdnost za 0,4 do 1,4 kp/mm<sup>2</sup> za vsak procent stopnje predelave. Justufson in Zackay (3), ki sta med pionirji TMP, sta ugotovila, da se utr-

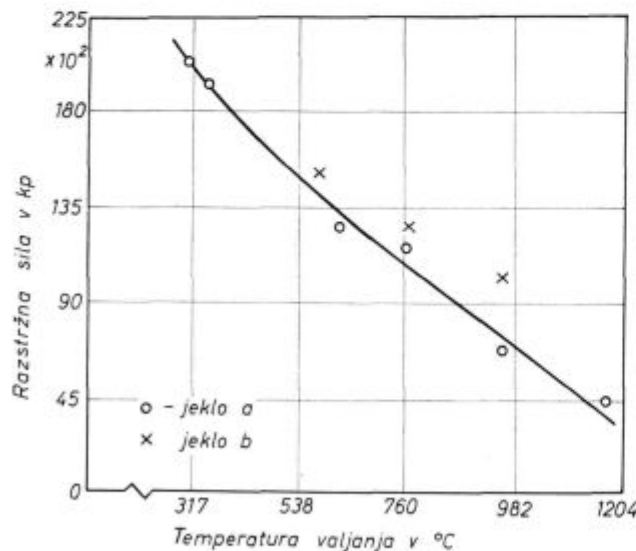


ditev jekla zmanjšuje s hitrostjo predelave (slika 2). Razlaga je, da je pri večjih hitrostih predelave zaradi adiabsatskega segrevanja izvrši neka vrsta



Slika 2  
Vpliv hitrosti iztiskanja na trdnost jekla

poprave deformirane strukture. O tem ni drugih podatkov, vendar lahko ta parameter zanemarimo v primerjavi z drugimi. Po Matasu in sodelavcih raste dosežena trdnost jekla pri isti redukciji s padanjem temperature predelave avstenita (slika 3). Vsaka transformacija avstenita po predelavi



Slika 3  
Vpliv temperature valjanja na raztržno silo pri 50% redukciji

- a) jeklo z 0,4% C; 1,1% Mn; 1,8% Si; 1,1% Ni; 2,1% Cr; in 0,3% Mo.  
b) podobno jeklo z 0,3 V.

v perlitni ali bainitni stopnji poslabša lastnosti jekla in sicer zmanjša trdnost in mejo plastičnosti, ne da bi se ustrezno povečala plastičnost jekla. Predelano jeklo je zato potrebno kaliti na martenzitu in nato s temperaturo popuščenja vplivati na razmerje med trdnostjo in plastičnostjo.

## 1.2. Parametri TMPVT

Nismo našli podatkov o vplivu različnih načinov predelave in malo je podatkov o vplivu hitrosti predelave. Sokolkov, Lozinski in Čuprakova (4) pravijo, da vpliva TMPVT pozitivno na lastnosti zlitin tipa nimonic in krom-nikelj-manganovega jekla pri visokih temperaturah, le če je bilo valjanje izvršeno z določeno hitrostjo, ki ustvari posebno oblikovane kristalne meje. Vpliv stopnje predelave sta prva raziskovala Bernštein in Rahšadt (5). Dognala sta da stopnja predelave v 1 prehodu v intervalu med 15 in 75% ne vpliva izrazito na trdnost jekla za vzmeti 55 HGR (0,5 C, 1 Mn, 1 Si in 0,003 B). Lastnosti so celo nekoliko slabše po veliki predelavi v enem prehodu zaradi notranjih poškodb v valjancu. Bron in Levites (6) navajata za jeklo iste vrste, da je največja utrditev pri stopnji predelave med 25 in 50%. Guljaev in Sigarov (7) pa sta ugotovila, da raste utrditev enakomerno s stopnjo predelave do 80% v jeklu z 0,5 C, 1,5 Cr, 4 Ni in 0,3 Mo. White (8) navaja, da je optimalni interval stopnje predelave 15 do 40% v enem prehodu. Izgleda, da tu še ni enotnega mišljenja, ampak da je ta parameter odvisen od vrste jekla, načina predelave in temperature predelave in ohlajanja. Ni pa mogoče pričakovati večjega uspeha, če je stopnja predelave manjša od 15%.

Prokoškin, Zubin in Akimov (9) so dognali, da je bolje, če visoko stopnjo predelave dosežemo z več prehodi med valji (tabela 1). Po močni redukciji v enem prehodu je utrditev topološko neenakomerna, nekatera mesta v mikrostrukturi jekla so manj utrjena in od takih mest je odvisna trdnost jekla. Če se izvrši predelava v več prehodih je večja gostota dislokacij v jeklu, drsne lamele so krajše in številnejše ter enakomernije razdeljene v manjših kristalnih zrnih. Iz takega drobnozrnatega avstenita nastane pri ohlajanju zelo fin martenzitu. Učinkovita pa je večja skupna predelava le če spremembe v intervalih med redukcijami ne eliminirajo pozitivnega vpliva parcialnih redukcij.

Ni zanesljivih podatkov o vplivu temperature predelave na utrditev jekla. Po že omenjenem Matasu in sodelavcih (slika 3), pada utrditev jekla sorazmerno z rasto temperature predelave tudi pri TMPVT. Prokoškin in sodelavci (10) pa so ugotovili, da temperatura predelave v intervalu med 750 in 900°C praktično ne vpliva na lastnosti predelanega jekla z 0,45 C; 5,2 Cr; 1,6 Ni; 1,6 Mo; 1,3 Si in 0,2 V. Ruski avtorji zanemarjajo vpliv temperature in je pri njihovih preizkusih predelava običajno izvršena z valjanjem med 900 in 1000°C le pri nerjavnih jeklih in posebnih zlitinah uporabljajo

Tabela 1 — Vpliv števila prehodov pri TMPVT s skupno redukcijo 60 % na mehanske lastnosti vzmetnega jekla 55 HGR

Število prehodov in redukcije	Trdota RC	Trdnost kp/mm <sup>2</sup>	Meja plastičnosti kp/mm <sup>2</sup>	Raztezek %	Kontrakcija %	Gostota dislokacij cm <sup>-3</sup>
0	56	206	154	2,5	14	—
1 60 %	56	237	195	8,1	30	2,2 · 10 <sup>11</sup>
2 30 + 30 %	57	245	206	9,4	31,3	—
3 20 + 20 + 20 %	58	250	216	9,9	31,8	4,7 · 10 <sup>11</sup>

Pogoji TMPVT: Temperatura začetka valjanja 900°, brez vmesnega žarenja med prehodi, kaljenje v olju, popuščanje 50 min. pri 220° C.

višje temperature. Izgleda, da se temperatura predelave ravna po odpornosti jekla proti deformaciji in po njegovi rekristalizacijski hitrosti. Čim hitrejša je rekristalizacija pri predelavi razdrobljene strukture jekla, t. j. čim manjša je njena odpornost proti rekristalizaciji, tem manjša naj bo temperatura predelave. Dregan in Bernštejn (11) sta ugotovila, da se lastnosti ne poslabšajo tudi če jeklo po predelavi rekristalizira in nastanejo le drobna zrna avstenita. Lastnosti se močno pokvarijo ko

nato avstenitna zrna zrastejo zaradi sekundarne rekristalizacije.

Po predelavi je potrebno jeklo ohladiti tako hitro, da se avstenit pretvori v martenzit, kajti, kot pri TMPNT, premena v perlitni ali bainitni stopnji zmanjša trdnost, ne da bi se ustrezno povečala plastičnost jekla. Nekatera jekla je potrebno kaliti, pri mnogih, n. pr. pri vzmetnem jeklu 55 HGR (tabela 2) tudi pospešeno ohlajanje valjanca v zračnem toku ne poslabša znatno trdnosti jekla.

Tabela 2 — Vpliv načina ohlajanja in pogojev popuščanja na mehanske lastnosti vzmetnega jekla 55 HGR. V števcu so lastnosti po ohladitvi v zračnem toku, v imenovalcu po kaljenju v vodi (Kaljner, Kossovski in Bernštejn 12). Skupna stopnja predelave v več prehodih 70 %.

Temperatura °C	Popuščanje		Trdnost kp/mm <sup>2</sup>	0,2 meja kp/mm <sup>2</sup>	Raztezek %	Kontrakcija %
	Trajanje ure					
brez popuščanja			240	218	6,5	18
			274	260	4,5	13
240	1		237	223	6,0	19
			258	235	7,0	19
240	4		253	218	6	18
			268	224	6,3	18
400	0,66		180	167	6,5	33
			192	172	7,0	34
650	0,5		156	130	11	48
			156	140	11,5	39
240 <sup>1</sup>	1		180	98	1	1
650 <sup>1</sup>	0,5		102	87	6,5	30

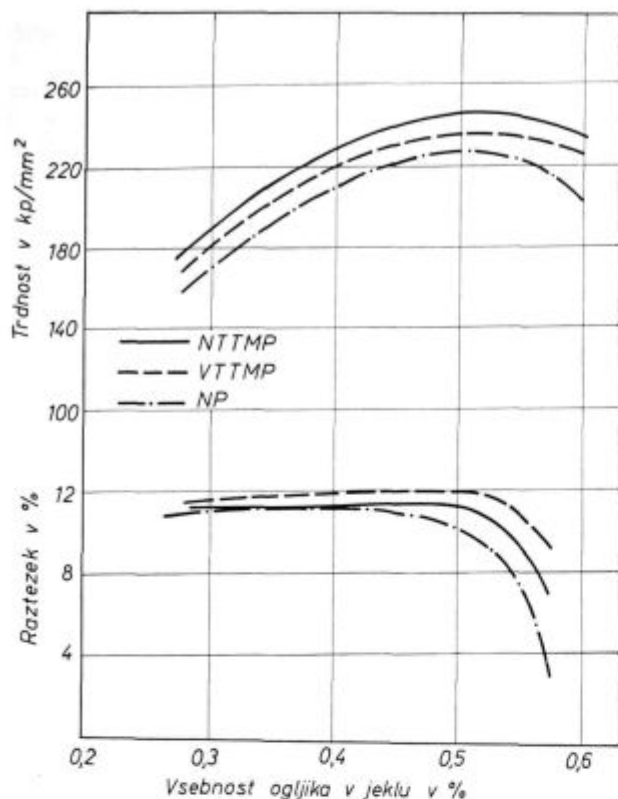
1. Konvencionalno termično obdelano jeklo

## 2. JEKLA PRIMERNA ZA TMP

### 2.1 Splošne zahteve

Za TMPVT so primerna praktično vsa jekla pod pogojem, da nima sekundarna rekristalizacija v njih tolikšne hitrosti, da je ni mogoče preprečiti z ohlajanjem po valjanju. Hyspecka in Mazanec (13, 14) sta valjala jekla z 0,27 do 0,57 C; 1 Si; 2 Cr; 2 Ni in 0,45 Mo z redukcijo 85 % pri padajoči tem-

peraturi 900 do 700° C in izotermno pri 550° C. Po valjanju sta vzorce takoj kalila v olju. Njuni rezultati (slika 4) kažejo, da je optimum mehanskih lastnosti jekla pri približno 0,5 % C, kar trdi tudi Duckworth (15). Pri 0,52 % C so bili prelomi preizkušancev žilavi po TMP, in krhki po klasičnem kaljenju, pri 0,58 % C pa v obeh primerih krhki. To kaže, da je nepriporočljivo povečati ogljik v podobnih jeklih nad 0,5 %, če so namenjena za TMPVT.



Slika 4

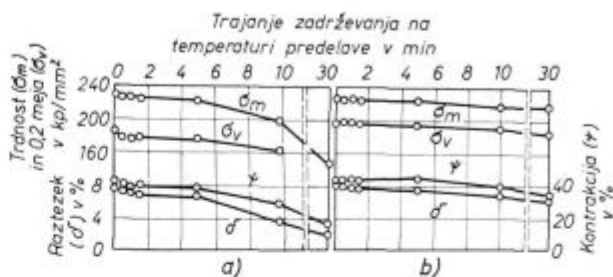
Vpliv vsebnosti ogljika v jeklu na trdnost in raztezek legiranih jekel za poboljšanje

Za TMPNT so primerna jekla, ki imajo v TT diagramu zadosti veliko področje metastabilnega avstenita in nosova perlitne in bainitne premene dovolj odmaknjena, da pri predelavi ne pride do ene ali druge transformacije, marveč le do nastanka martenzita. Taka so legirana jekla, ki vsebujejo krom, nikelj, mangan, silicij, molibden in druge elemente in so namenjena za poboljšanje, ali pa tudi ne.

Pozitivne rezultate pa je dal tudi preizkus TMPVT nelegiranega jekla z 0,4 C in 0,6 Mn v industrijskih razmerah, ki so ga izvršili Andrejeva

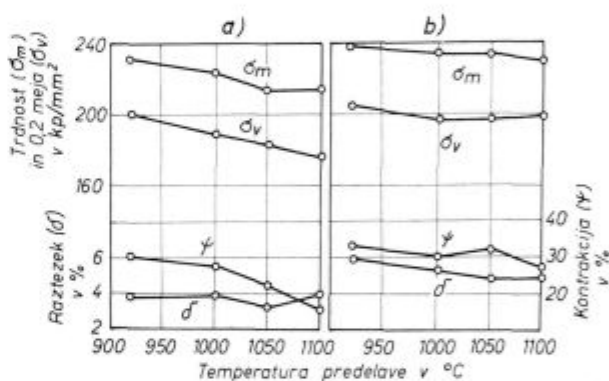
in sodelavci (16). Rezultate navajamo v tabeli 3. Uspeh sta dosegla Kristal in Rjazancev (28) tudi z TMPVT mehkejšega jekla z 0,2 C in 0,5 Mn.

TMPVT je lažje izvršiti, če jeklo po predelavi počasi rekristalizira. Bernštejn in Zueva (17) navajata, da mangan in nikelj zavirata rekristalizacijo jekla po TMPVT, vendar je nasprotni pospeševalni vpliv ogljika mnogo močnejši. Prokoškin in sodelavci (18) so ugotovili, da v jeklih 55 HGR,



Slika 5

Vpliv zadrževanja na temperaturi predelave po valjanju na mehanske lastnosti jekla 55 HGR brez dodatka cirkona (a) in z dodatkom cirkona (b). Temperatura valjanja 970 °C, redukcija 40 %, kaljenje v olju, popušcanje 1 uro pri 200 °C.



Slika 6

Vpliv temperature TMPVT na mehanske lastnosti jekla 55 HGR brez dodatka cirkona (a) in z dodatkom cirkona (b)

Tabela 3 — Mehanske lastnosti jekla tipa 40 (0,4 C; 0,6 Mn) po TMPVT (števec) in konvencionalni predelavi in termični obdelavi (imenovalec) v odvisnosti od temperature popušcanja

Temperatura popušcanja °C	Trdnost kP/mm <sup>2</sup>	0,2 meja kP/mm <sup>2</sup>	Raztezek %	Kontrakcija %	Zilavost kP/cm <sup>2</sup>
200	201	160	7	40	3,5
	145	127	2	16	3
300	181	150	7,5	39	3
	146	124	7	35	4
400	141	126	8,5	53	8
	120	112	8,5	50	8,5
500	135	120	11	55	11
	102	90	12	60	12
600	101	91	17	60	13
	80	68	16	60	20

55 CG2P (0,55 C; 1,6 Mn in 1 Cr) in 40 X HSVF (0,4 C; 1 Si; 1,5 Ni; 1 W in 0,2 V) dodatek mišmetala (0,3 %), cirkona (0,12 %) ali cera (0,15 %) močno zavre sekundarno rekristalizacijo predelanega jekla in ohrani drobnozrnato strukturo avstenita. Zato čas zadržanja na temperaturi valjanja 920° C praktično ne vpliva na mehanske lastnosti jekla (slika 5). Dodatek cirkona v jeklo zmanjša na zamenarljivo stopnjo tudi vpliv temperature predelave jekla (slika 6).

## 2.2 Jekla za vzmeti

V sovjetskem strokovnem tisku je mnogo članov o TMPVT jekel za vzmeti predvsem o že večkrat omenjenem jeklu 55 HGR. Ker so avtorji obravnavali v praktično vseh preizkusih vplive različnih tehnoloških parametrov in dosegli dobre rezultate, lahko sklepamo, da se v SZ TMPVT uporablja za izdelavo vzmeti. V ameriškem tisku je malo podatkov. Marshall in sodelavci (19) trdijo, da se vzmeti za tovarnjake izdelujejo po ausforming postopku. Clark in Harwood (20) sta nekoliko konkretnješa v članku, v katerem obravnavata upo-

rabo TMP za različne izdelke, katere potrebuje motorna industrija. Taki izdelki so trdni in žilavi ter še posebej primerni za dinamično ali na utrujenost obremenjene dele vozil. Teža vzmeti za tovarnjak se je zmanjšala za 1/3 z uporabo z TMPNT izdelanih vzmeti, pri isti teži vzmeti pa se lahko dovoljena obremenitev poveča skoraj na dvojno velikost. Če želimo, da bo TM predelano jeklo lahko tekmovalo s standardnim jeklom za vzmeti SAE 5160, mora biti vzmetni sklop boljši, kriterij za presojo pa so cena jekla, uporabnost vzmeti in izdelavni stroški. Od vseh preizkušenih jekel za vzmeti se je za TMP najbolj obneslo jeklo D6A. To jeklo je dražje od standardnega jekla SAE 5160, zaradi zmanjšanja števila listov in teže vzmeti, ki sta mogoča zaradi boljših lastnosti (tabela 4), pa postane gospodarsko primernejše. TMP je še bolj primerna za izdelavo torzijskih vzmeti, ki se po valjanju le malo mehansko obdelujejo. Po sedanjih izkušnjah sta najbolj primerni za torzijske vzmeti jekli H 11 (0,4 C; 1 Si; 5 Cr; 1,3 Mo in 0,5 V) in D6A. Zelo dobre mehanske lastnosti omogočajo, da se uporabi dimenzijsko manjše vzmeti, kar mnogokrat zelo olajša delo konstrukterja.

Tabela 4 — Lastnosti jekel za listaste vzmeti

Jeklo in predelava ali obdelava	Področje obremenitve pri čistem upogibu kp/mm <sup>2</sup>	Število upogibov do preloma
D6A, TMPNT	70-150	250.000
(0,5 C; 1 Cr; 1 Mo in 0,5 Ni)	70-155	235.000
Valjana površina	70-150	1.000.000
Brušena površina	135-215	100.000
SAE 5160 klasično toplotno obdelano (0,6 C; 0,9 Mn; 0,8 Cr)	50-100	100.000
Neobdelana površina	63-145	20.000
Peskana površina	35-115	100.000

## 2.3 Orodna jekla

Clark in Harwood navajata, da se pri firmi Ford zelo zanimajo za TMP različnih orodnih jekel, ker s to predelavo dobijo jekla visoko trdnost in žilavost, odpornost proti utrujenosti v hladnem in v vročem ter visoko trdoto v vročem, kar so vse pogoji za dobra orodja. Orodja za hladno kovanje, kovičenje, prebijanje in iztiskanje, izdelana s TMP, so imela pri istih pogojih dela za do 500 % večjo življenjsko dobo, kot orodja izdelana s klasično termično obdelavo (tabela 5). Trn za vroče prebijanje zobnikov, izdelan iz jekla H 12 (0,35 C; 5 Cr; 0,4 V; 1,5 W in 1,5 Mo) je zdržal povprečno 14000 prebijanj, trn iz istega jekla izdelan s TMPNT (680° C, 50 %) pa je zdržal povprečno 25000 prebijanj. Za uveljavitev TMP orodnih jekel sta dve poti: uporabljati cenejša legirana jekla, katerim daje TMP enake lastnosti kot klasična toplotna obdelava bolj legiranim jeklom ali pa tem jeklom povečati s TMP zdržljivost. Po mnenju Clarka in

Harwooda bodo prihranki pri uporabi v obeh primerih pokrili stroške TMP.

Telang in Clark navajata, da dobi jeklo z 0,5 C; 2 W; 2,6 Mo in 4,5 Cr s TMPNT trdnost 320 kp/mm<sup>2</sup>. Pri tej trdnosti ima raztezek 8 % in precejšnjo žilavost, tako da je zelo primerno za orodja. Z orodjem iz jekla H 11, ki je bilo izdelano s TMP, je bilo izdelano 3-krat več vijakov 5/16", kot z orodjem iz višje legiranega jekla T5 (0,8 C; 4 Cr; 2 V; 18 W in 8 Co), ki je bilo klasično termično obdelano in je bilo za 1 do 2 Rc trše. Delo z orodjem iz jekla H 11 so prekinili zaradi obrabe, orodja iz jekla T5 pa se navadno pokvarijo zaradi utrujenosti jekla.

Glava za kovičenje iz jekla S5 (0,55 C; 0,85 Mn; 2 Si; 0,25 Cr; 0,2 V in 0,4 Mo), toplotno obdelana na 61 Rc, je zdržala 46 ur, s TMPNT izdelane glave iz jekla H 11 pa 65 ur. Izkušnje kažejo, da daje TMP jeklu večjo odpornost proti izmenični mehanski in toplotni obremenitvi, ki je navadno vzrok preloma orodij za delo v vročem, zato se s TMP izdelana



Tabela 5 — Vzdržljivost nekaterih orodij

Orodje	Jeklo in obdelava ali predelava	Št. kosov
Kladivo za kovičenje	T5, konvencionalna obdelava (0,5 C; 4 Cr; 2 V; 18 W in 8 Co)	200.000
Kladivo za kovičenje	H 11, ausforming (0,4 C; 1 Si; 5 Cr; 1,3 Mo in 0,5 V)	600.000
Kladivo za udarjanje vgreznjene glave vijakov	T5, konvencionalna toplotna obdelava	30.000
Kladivo za udarjanje vgreznjene glave vijakov	H 11, ausforming	70.000
Trn za hladno prebijanje	M2, konvencionalna toplotna obdelava (0,85 C; 4 Cr; 2 V; 6 W in 5 Mo)	77.000
Trn za hladno prebijanje	H 11, ausforming	120.000

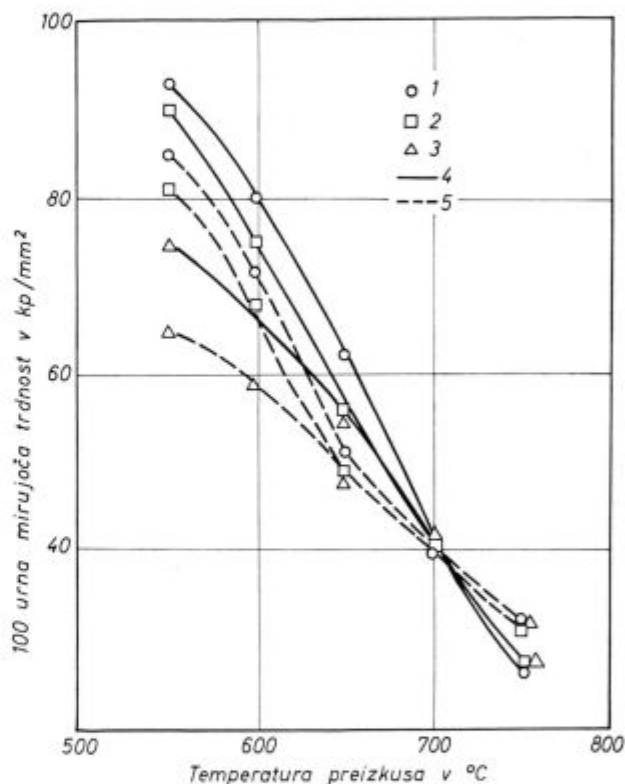
orodja izločijo zaradi obrabe. Zaradi boljše žilavosti, ki jo daje TMP v primerjavi s klasično toplotno obdelavo, bo mogoče še povečati obrabno trdnost jekel z večjo vsebnostjo ogljika. Zelo je verjetno da bosta jekli H 11 in H 12 (0,35 C; 1 Si; 5 Cr; 0,4 V; 1,3 W in 1,5 Mo) uspešno zamenjali dražji in bolj legirani jekli T5 in M2 (0,85 C; 4 Cr; 2 V; 6,25 W in 5 Mo) pri izdelavi orodij za delo v hladnem.

Mihčev in sodelavci (22) so ugotovili, da se s TMP poveča tudi rezna obstojnost nožev. Optimalna stopnja predelave je 25 do 30 %. Karpov (23) je s TMP jekla P18 (0,75 C, 18 W, 4,2 Cr, 1,2 V) povečal obstojnost svetrov pri vrtanju kaljenega jekla za 20 do 30 %.

#### 2.4. Jekla in zlitine za uporabo pri visokih temperaturah

Sadovski in sodelavci (24) trdijo, da se s TMP izboljšajo mehanske lastnosti jekel v toplem. Npravili so številne preizkuse na zlitinah tipa nimonin, na nerjavnem krom-nikelj-titanovem jeklu s 33 % (A) oz. 20 % niklja (C), ki se utrjuje zaradi izločanja intermetalne faze nikelj-titan, na čistem niklju in na krom-nikelj-manganovem jeklu (C). TMP so izvršili s 25 — 30 % redukcijo z valjanjem pri hitrosti 1,5 m/min. Temperature valjanja so bile: 1080° C za zlitine nimonin, 1150° C za jeklo A, 1100° C za jeklo B ter 800° C za čisti nikelj. Vse vzorce so po valjanju gasili v vodi in jih nato žarili pri 750 ali 700° C. Na sliki 7 vidimo kako TMP vpliva na 100-urno natezno trdnost zlitine nimonin in jekel A in B. Trdnost po TMPVT je večja od trdnosti primerjalnega jekla, razlika pa se zmanjšuje z naraščanjem temperature in nad 700° C ima celo večjo trdnost jeklo, ki je bilo valjano na normalen način. To dognanje se ujema s starejšimi dognanji Zackaya in Justufsona (3).

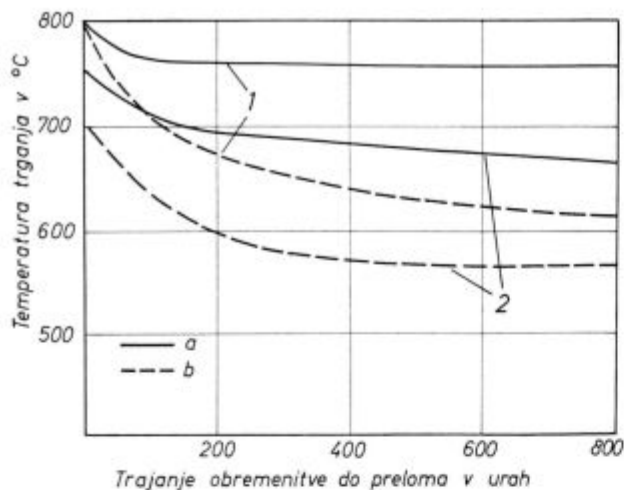
Zanimivo je dognanje, da TMPVT poviša temperaturo pojava interkristalnega preloma (slika 8), poviša torej temperaturo, ko se začne deformacija



Slika 7

Vpliv temperature preizkusa na 100-urno mirujočo trdnost za zlitino nimonin (1) in krom-nikelj-titanovi jekli A in B (2 in 3) po TMPVT (4) in navadni termični obdelavi (5).

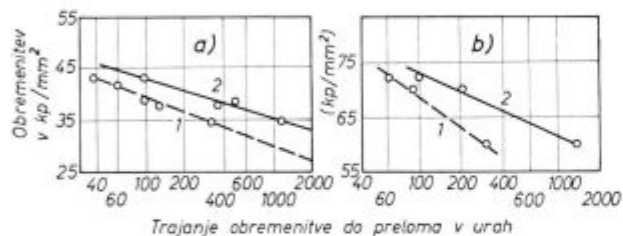
pri statični obremenitvi v vročem z drsenjem kristalnih zrn drugo ob drugim, to je ekvikohezijsko temperaturo. Nad to temperaturo je trdnost urejene notranjosti kristalnih zrn večja od trdnosti kristalnih mej. Sadovski in soavtorji smatrajo, da ima TMPVT za posledico nastanek kristalnih mej z žagasto obliko, ki zavira drsenje kristalnih zrn drugo ob drugem. Nad 700° C so difuzijski pojavi že dovolj močni, da se žagaste meje pretvorijo v gladke. TMPVT izboljša tudi mehanske lastnosti



Slika 8

Vpliv TMP na temperaturo pojava interkristalnega preloma zlitine nimonoc pri dolgotrajnih statičnih preizkuh.

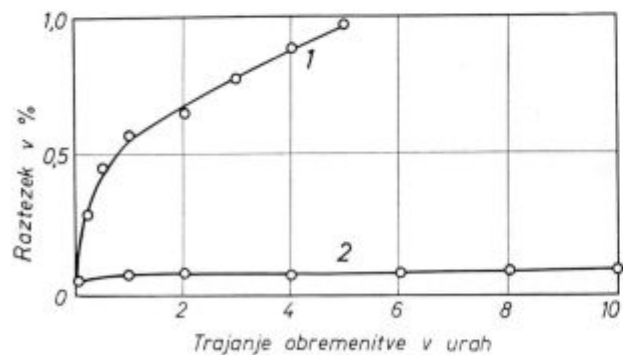
- 1 — temperatura pojava interkristalnega preloma,
- 2 — temperatura čisto interkristalnega preloma.
- a — TMPVT
- b — navadna predelava.



Slika 9

Odvisnost med časom do preloma in obremenitvijo pri 650 °C (a) in 500 °C (b) za krom-nikelj-manganovo jeklo po gašenju (1) in po TMPVT (2).

krom-nikelj-manganovega jekla (slika 9). TMP zmanjša hitrost deformacije v vročem pri isti obremenitvi, npr. hitrost lezenja (slika 10). Zato je izboljšanje v mehanskih lastnostih mnogo bolj jasno, če ga izrazimo s prelomno trdnostjo po dolgotrajni statični obremenitvi, ali pa s primerjavo hitrosti lezenja, kot s trdnostjo pri kratkotrajni



Slika 10

Krivulje lezenja tehničnega niklja pri temperaturi 500 °C in obremenitvi 12 kp/mm<sup>2</sup>.

- 1 — klasična predelava,
- 2 — TMPVT.

statični obremenitvi. Sokolkov in soavtorji (4) tolmačijo izboljšanje mehanskih lastnosti v vročem na podoben način. Trdijo pa, da nastanejo žagaste kristalne meje le pri določeni hitrosti predelave, ki je značilna za posamezna jekla. S temperaturo predelave raste amplituda nazobčanosti kristalnih mej, vzporedno s tem pa se zmanjšuje učinkoviti vpliv teh mej. Lozinski in soavtorji (25) navajajo, da je jeklo predelano po TMPVT bolj odporno proti menjajočim se obremenitvam pri temperaturah 650 in 850 °C, kot klasično predelano ali termično obdelano jeklo.

Naši preizkusi so pokazali, da TMP povečuje plastičnost jekla pri visoki temperaturi in njegovo odpornost proti širjenju interkristalnih razpok, zmanjšuje pa trdnost jekla. Poizkuse smo napravili z jeklom z 0,3 C; 2,9 Si in 7,6 Cr. Temperatura segrevanja pred predelavo in temperatura kaljenja primerjalnih vzorcev je bila 1040 °C. Predelavo smo izvršili z valjanjem jekla pri temperaturah približno 600, 745, 860 in 945 °C ter z vlečenjem jekla pri 600 °C. Po predelavi smo vzorce kalili v vodi, žarili 2 uri pri 720 °C in 20 min. trgali pri 600 in 700 °C. Rezultate podajamo v tabeli 6. Trdnost predelane jekla je pri 600 °C za 5 do 10 % manjša, pri 700 °C pa za 10 do 20 % manjša od trdnosti jekla, ki je bilo poboljšano na klasični način. Pri 600 °C je razteznost boljša za povprečno 20 do 35 %, kontrakcija pa za 30 do 40 %; pri 700 °C sta razliki 35 do 75 in 60 do 65 %. Prelomne površine so bile čisto intrakristalne ali intrakristalne z majhnimi dekohezijskimi razpokami na vzorcih TMP jekla in interkristalne z močnimi dekohezijskimi razpokami na jeklu, ki je bilo termično obdelano na klasičen način.

Mikroskopsko opazovanje je še bolj odkrilo razliko med obema vrstama vzorcev. V strukturi ni bilo med njimi nobenih opaznih razlik, zelo pa sta se obe vrsti vzorcev razlikovali po obliki, velikosti in številu razpok ob prelomni površini preizkušancev. V jeklu, poboljšanem na klasičen način, so bile razpoke izrazito interkristalne, redke, zelo velike in pokončne na smer vlečenja (sliki 11 in 12).



Slika 11

x 100, klasično toplotno obdelano, temperatura trganja 600 °C.

Tabela 6 — Mehanske lastnosti jekla z 0,3 C; 2,9 Si in 7,6 Cr po TMP. Stevilke v tabeli so srednja vrednost 2 preizkusov

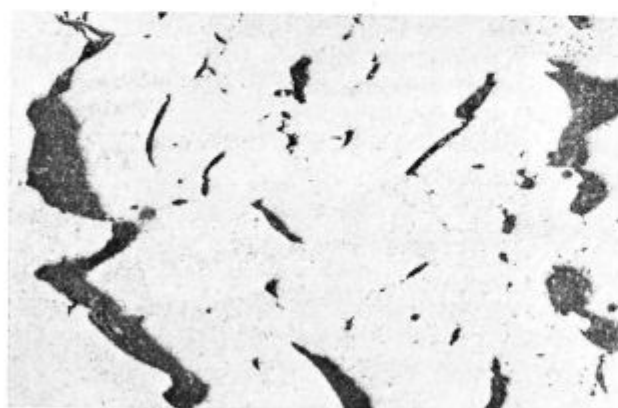
Način in temperatura predelave	Valjanje 945° C				Valjanje 860° C				Valjanje 745° C			
	20		35		20		35		20		35	
Približna stopnja redukcije (%)												
Temperatura preizkusa (°C)	600	700	600	700	600	700	600	700	600	700	600	700
Trdnost (kp/mm <sup>2</sup> )	22,6	9,5	22,7	9,6	20	10,1	23,4	9,9	21,3	9,1	22,7	11,1
Raztezek (%)	50	53	53	48	46	41	47	41	43	51	34	40
Kontrakcija (%)	83	74	85	74	83	73	85	70	77	70	83	72
Oblika preloma <sup>1</sup>	1	2,3	1	1	1	2,3	1	2,3	1,2	3,2	1	1,2

Način in temperatura predelave	Valjanje 600° C				Vlečenje 600° C				Klasična toplotna obdelava (a)	
	20		35		20		35			
Približna stopnja redukcije (%)										
Temperatura preizkusa (°C)	600	700	600	700	600	700	600	700	600	700
Trdnost (kp/mm <sup>2</sup> )	22	8,6	21,2	8,6	22,3	8,8	21,7	9,8	23,4	10,9
Raztezek (%)	44	53	41	49	51	57	46	53	37	30
Kontrakcija (%)	83	72	84	73	84	72	68	71	62	44
Oblika preloma <sup>1</sup>	1	1	1	1,2	1	2,3	1	2,3	3	4

a) Temperatura kaljenja 1040° C

**Oblika preloma:** 1 — intrakristalen; 2 — intrakristalen z majhnimi znaki dekohezije po kristalnih mejah, 3 — mešan z jasnimi znaki dekohezije po kristalnih mejah; 4 — interkristalen z močnimi znaki dekohezije po kristalnih mejah.



Slika 12

x 100, klasično toplotno obdelano, temperatura trganja 700° C.

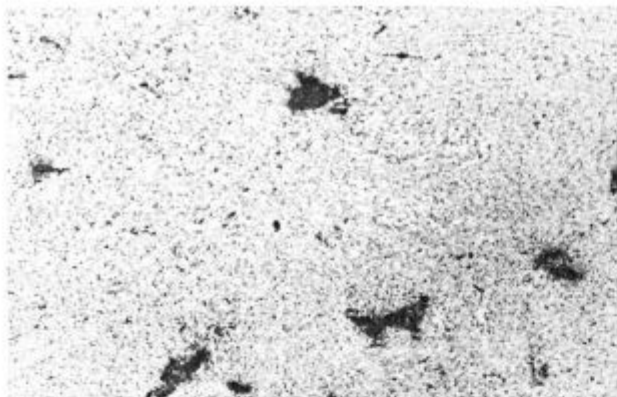


Slika 13

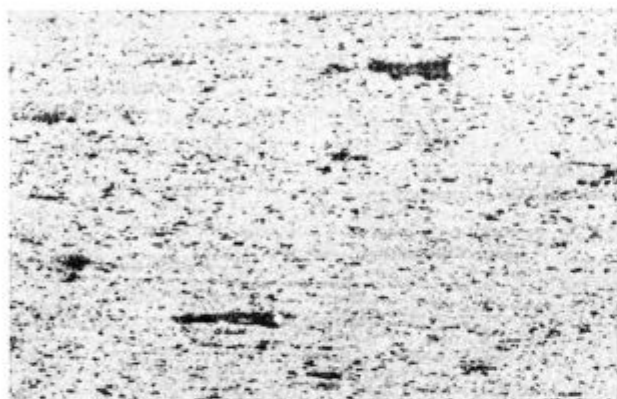
x 200, vlečeno pri 600° C, redukcija 34 %, temp. trganja 600° C.

Podobne, vendar mnogo manjše so bile razpoke na vzorcih, ki so bili vlečeni pri 600° C (sliki 13 in 14). Na valjanih vzorcih so bile razpoke drugačne. Na preizkušancih, ki so bili trgani pri 600° C so bile razpoke majhne, zelo številne in raztegnjene v

smeri vlečenja (slike 15, 16, 17 in 18). Na obruskih je bilo mogoče videti, da niso nastale na kristalnih mejah, ampak na vključkih titanovega karbida ali karbonitrida. Na vzorcih, ki so bili trgani pri 700° C so bile razpoke tudi zelo



Slika 14  
x 200, isto kot sl. 13, temperatura trganja 700 °C



Slika 15  
x 200, valjano pri 945 °C, redukcija ca. 35 %, temperatura trganja 600 °C



Slika 16  
x 200, valjano pri 860 °C, redukcija ca. 35 %, temperatura trganja 600 °C

številne (slike 19, 20, 21 in 22) manj raztegnjene v smeri vlečenja in le v redkih primerih jih je bilo mogoče za gotovo oceniti kot interkristalne. Na osnovi naših rezultatov je mogoče sklepati, da tem-

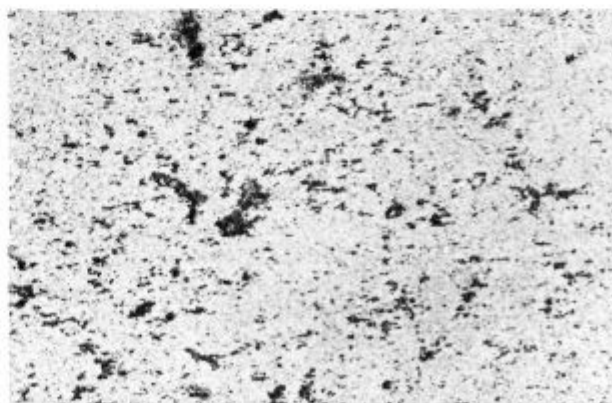
peratura in stopnja predelave ne vplivata na mehanske lastnosti jekla, na način nukleacije razpok in na način preloma preizkušene jekla pri trganju pri 600 in 700°C.



Slika 17  
x 200, valjano pri 745 °C, redukcija ca. 35 %, temperatura trganja 600 °C

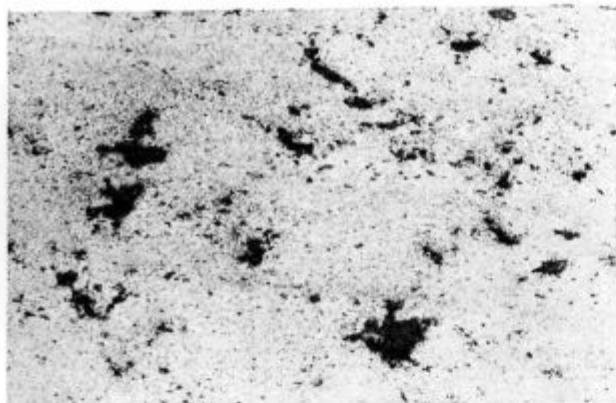


Slika 18  
x 200, valjano pri 600 °C, redukcija ca. 35 %, temperatura trganja 600 °C

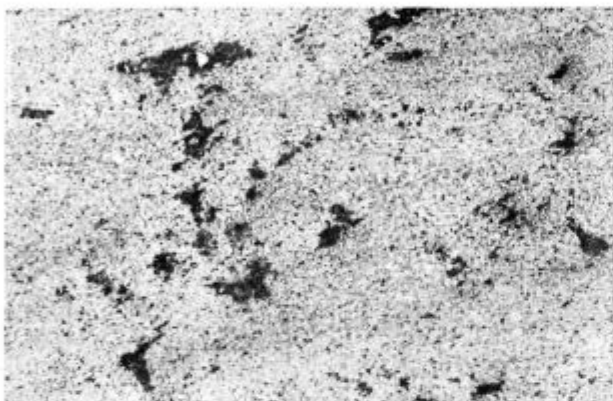


Slika 19  
x 200, valjano pri 945 °C, redukcija ca. 35 %, temperatura trganja 700 °C

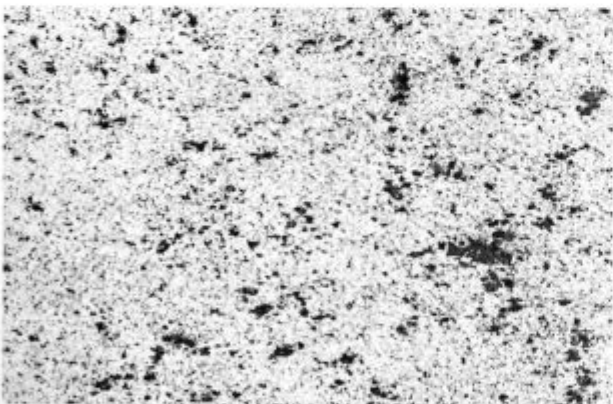




Slika 20  
x 200, valjano pri 860 °C, redukcija ca. 35 %, temperatura  
trganja 700 °C



Slika 21  
x 200, valjano pri 745 °C, redukcija ca. 35 %, temperatura  
trganja 700 °C



Slika 22  
x 200, valjano pri 600 °C, redukcija ca. 35 %, temperatura  
trganja 700 °C.

### 2.5. Druga jekla

Justufson in Zackay navajata, da se TMP lahko izvrši na številne načine, npr. z valjanjem, vlečenjem, iztiskanjem, kovanjem, globokim vlečenjem z oblikovanjem z eksplozivom. To odpira

TMP perspektivo na mnogih področjih. Bernštejn in sodelavci (11,26) so TMP uporabili pri izdelavi cevi za naftno industrijo. Carter (27) omenja, da so v toku poizkusi za uporabi TMP pri izdelavi lopatic za parne turbine iz jekla z 0,1 C in 12 Cr, za izdelavo visokotrdnih vijakov in visoko obremenjenih delov motorjev, npr. različnih ročic, osi, gredi in zobnikov ter celo za predelavo jekla za ležaje. Dulis (29) in Perry (30) poročata, da je martenzitno jeklo z okoli 12 Cr in 0,20 C po TMP bolj odporno proti napetostni koroziji, vodikovi krhkosti in splošni koroziji kot isto jeklo, ki je dobilo isto trdnost s klasično termično obdelavo.

Marshall in sodelavci (19) trdijo, da so pri kovanju prednosti »ausforginga« precejšnje: boljše mehanske lastnosti odkovkov, lepša površina, manjši odrezek, manjše deformacije in izkrivljenje, ker ni potrebna naknadna termična obdelava odkovkov in manjši obseg mehanske obdelave. Velika prednost je v tem, da se da doseči zahtevane lastnosti z mehkejšim materialom. Za izdelavo visoko obremenjenih ročic so lahko npr. uporabili jeklo SAE 4340 (0,4 C; 0,9 Cr in 0,2 Mo) namesto že večkrat omenjenega bolj legiranega jekla H 11. Slabe strani so: večja uporaba energije za preoblikovanje, nekoliko večja obraba orodja (odpade, če uporabimo mehkejšo jeklo), strožje temperaturne tolerance za predelavo in nekoliko težja mehanska obdelava. Clark in Harwood navajata podatke po Banbergerju, da ima jeklo M 50 (0,8 % C; 4 % Cr; 1 % V in 4 % Mn) po TMP za 800 % oz. 330 % večjo trajnost do trenutka, ko je poškodovanih 5 % oz. 50 % ležajev v primerjavi s klasično termično obdelanim istim jeklom. TMP poveča odpornost jekla proti kotalni utrujenosti za 300 %.

### 3. MEHANIZEM UTRDITVE JEKLA PRI TMP

Ne bi mogli reči, da je popolnoma jasen mehanizem utrditve. Večina avtorjev meni, da se pri TMPNT metastabilni avstenit utrdi zaradi hladne deformacije, tej utrditvi pa se pridruži še utrditev zaradi nastanka fino zrnatega martenzita. Zaradi hladne predelave zraste gostota dislokacij. Brown, Thomas in Hardy (31) smatrajo, da se utrditev dislokacij utrdi zaradi izločenih karbidnih kali ali oblakov atomov ogljika. Duckworth (13) meni, da atomi ogljika utrdijo konfiguracijo dislokacij, katero podeduje martenzit od avstenita, ugodno pa vpliva tudi zelo drobnozrnati martenzit. Guljajev in Šigarev sta ugotovila, da so zaradi TMP pri 900, 750 in 550 °C razširjene črte (110) odboja rentgenskih žarkov. To jima je dokaz za trditev, da se med deformacijo izločajo iz avstenita karbidi. Tudi Mazanec in Hispecka smatrata, da je ta razlaga precej verjetna, menita pa, da je o tem premalo eksperimentalnih dokazov. Nam se zdi nekoliko dvomljiva trditev, da se karbidi ali karbidne kali izločajo med deformacijo pri temperaturi, ko je jeklo v homogenem avstenitnem področju. Zdi se

nam verjetneje in s fizikalnega stališča mogoče, da se okoli mest z močno koncentracijo dislokacij zberejo neke vrste Cotrellovi oblaki, ki so sestavljeni v glavnem iz ogljikovih atomov in so dislokacije zasidrane podobno kot pri nizkih temperaturah, ko je rezultat njihove interakcije z Cotrellovimi oblaki meja plastičnosti jekla. Zaradi velike množine ogljika v jeklu in številnih dislokacij, je učinek zelo močan. Taki oblaki nastanejo že pri sobni temperaturi, pri katerih je gibljivost atomov ogljika premajhna, da bi lahko nastali izločki karbidov ali nitridov, zato se lahko oblikujejo pri visoki temperaturi v presledku med deformacijo in kaljenjem. Pri oblikovanju teh oblakov ostane ogljik v raztopini in ni nobenega izločanja, ki bi bilo v protislovju s stabilnostjo avstenita. Pač pa je s stališča stabilnosti avstenita mogoče, da nastanejo kali ali izločki pri ausforming predelavi. Vprašanje je le, če je čas, ki ga imajo karbidi ali kali na razpolago pred ohladitvijo dovolj dolg za tvorbo.

Zasidrana ureditev dislokacij je precej stabilna. Dregan in Bernštejn sta ugotovila, da se lastnosti jekla ne poslabšajo, pa čeprav po predelavi jekla rekristalizira in nastanejo iz zdrobljenih zrn avstenita nova drobna kristalna zrna. To je potrdil tudi Prokoškin s sodelavci. Lastnosti se poslabšajo, če se izvrši tako imenovana sekundarna rekristalizacija, pri kateri drobna avstenitna zrna, nastala s primarno rekristalizacijo, zrastejo na velikost, ki je značilna za temperaturo konca predelave, stopnjo predelave in sestavo jekla.

Drobnozrnati martenzit, ki nastane iz avstenita podeduje ureditev dislokacij deformiranega avstenita. Jeklo se utrdi zaradi martenzitne premene, ureditev dislokacij pa daje martenzitu potrebno plastičnost tako, da se lahko pokaže njegova velika naravna trdnost, ki sicer ne pride do izraza zaradi popolnoma krhkega preloma. Oblaki atomov okoli nakopičenj dislokacij so verjetno kali za nastanek karbidov. Pri popuščanju jekla se zato izločajo zelo številna in enakomerno razdeljena karbidna zrna, zato je popuščna obstojnost jekla višja. V TMP jeklu pogoji za izločanje karbidov ob mejah niso bolj ugodni kot pogoji za izločanje v notranjosti zrn, kot je to pri klasični toplotni obdelavi, zato TMP odpravi tudi popuščno krhkost.

Dokaz, da je nastala ureditev dislokacij precej stabilna, je neke vrste »dednost« lastnosti, ki jih dobi jeklo pri TMPVT. Ta pojav sta odkrila Bernštejn in Rahstadt na jeklu za vzmeti 55 HGR, potrdili pa so ga še drugi ruski avtorji. Ko sta TMP jeklo, popuščeno pri 250° C, s trdnostjo 215 kp/mm<sup>2</sup> žarila pri 600° C, da je doseglo trdoto 32 Rc in ga po 3-minutni avstenitizaciji pri 880° C kalila in popustila pri 250° C, je doseglo spet približno začetno trdnost. Kaljner, Kosovski in Bernštejn (12) so ugotovili, da se s povišanjem temperature vmesnega »mehkega žarjenja« poslabšajo pri ponovnem kaljenju pridobljene lastnosti. Supov in sodelavci (31) so poskusili razložiti pojav dednosti. Ugotovi-

vili so, da hladna deformacija izboljša lastnosti TM predelanega jekla, vendar se njegova trdnost s temperaturo hitreje zmanjšuje, kot če jeklo ni bilo hladno deformirano. Tudi po ponovnem kaljenju se zaradi hladne predelave nekoliko poslabšajo trdnostne lastnosti. Iz tega bi lahko sklepali, da je mehanizem utrditve pri TMPVT drugačen kot pri hladni deformaciji. Zanimivo je dognanje (18) da je sposobnost »dedovanja« tem večja čim višja je temperatura predelave. Iz tega bi lahko sklepali, da je struktura, ki jo dobi jeklo s TMPVT tem bolj stabilna, čim višja je temperatura predelave. V strokovnem tisku nismo dobili podatkov o tem ali so »dedne« tudi lasnosti, ki jih dobi jeklo pri TMPNT.

Ni jasno, zakaj dodatna hladna deformacija poveča trdnost TMP strukture, istočasno pa zmanjša njeno popuščno obstojnost in dednost. Deformacija hladnega martenzita se izvrši z drsenjem po drugih sistemih, kot so bili sistemi v avstenitu. Ta deformacija dodatno zasidra podedovano dislokacijsko ureditev avstenita in jeklo utrdi. Ker pa je s hladno predelavo pridobljena ureditev temperaturno malo obstojna, mogoče proces odprave te utrditve pri segrevanju jekla zmanjša stabilnost pri TMPVT nastale ureditve dislokacij.

Ruski avtorji navajajo, da TMPVT izboljša tudi mehanske lastnosti v zlitinah brez premene. Verjetno je način utrditve isti kot način, ki je znak utrditve jekel z ogljikom: sumiran vpliv zasidrane dislokacijske ureditve in drobnih zrn, odpade pa delež utrditve zaradi premene. Ruski avtorji navajajo, da je v takih materialih utrditev v zvezi z obliko kristalnih mej. Pri TMPVT dobijo kristalne meje žagasto obliko. Take meje pa lahko močnejše prispevajo k utrditvi le pri obremenitvi nad temperaturo ekvikohezije, ko se deformacija vrši z lezenjem kristalnih zrn drugo ob drugem. To je vzrok, da ima TMP jeklo višjo temperaturo interkristalnega preloma. Ko pa je temperatura dovolj visoka, da rekristalizacija poravnava nazobčane kristalne meje, postane trdnost TMP jekla manjša od trdnosti klasično predelanega jekla prav zato, ker je prvo bolj drobnozrnato, in ima nad temperaturo ekvikohezije več bolj šibkih kristalnih mej. Verjetno je tudi to razlog za večjo plastičnost in manjšo trdnost jekla pri temperaturah 600 in 700° C, katero smo ugotovili pri naših preizkusih. Interkristalni prelom nastane pri trganju v vročem zaradi koalescence vrzeli, ki tvori interkristalne razpoke na geometrično in deformacijsko najbolj neugodnih mestih. Razpoke rastejo zaradi nepretrganega dodatka vrzeli, katere ustvarja deformacija v toplem, dokler se preizkušane ne pretrga. Verjetno TMP ne zmanjša nastajanja vrzeli, pač pa povzroči, da se njihova koalescenca začne na mnogih mestih. Namesto redkih velikih razpok, ki hitro privedejo do preloma, nastane veliko manjših razpok in kovina se prelomi pri večji deformaciji.

## SKLEP

Rezultati dela številnih raziskovalcev kažejo, da TMP ugodno vpliva na lastnosti jekla. Povečuje trdnost, mejo plastičnosti, plastičnost, utripno trdnost, vzmetnost, obrabno in kotalno trdnost, popuščno obstojnost, odpornost proti toplotnemu udaru korozijsko odpornost in odpravlja popuščno krhkost. Zato je mogoče pri istih jeklih s TMP doseči boljše mehanske lastnosti in večje obremenitve konstrukcijskih delov ali pa uporabiti za iste namene cenejša in manj legirana jekla. Slabe strani so razmeroma maloštevilne, med njimi sta najvažnejša dražja tehnologija in težja mehanska obdelava. Vprašamo se lahko zato zakaj se, kljub

mnogim prednostim, TMP sorazmerno počasi uveljavlja v industrijski praksi ali se vsaj malo piše o tem. Med vzroke lahko naštejemo predvsem pomanjkanje izkušenj pri tehnološki aplikaciji TMP pri izdelovalcih jekla in pomanjkanje izkušenj pri trajnem pogonu izdelkov izdelanih s TMP pri uporabnikih jekla. Razumljivo je, da uporabniki niso pripravljani plačati večje cene za polizdelke ali orodja, dokler jim praksa ne bo pokazala, da se je razlika v ceni izplačala. Domnevamo pa, da se TMP uporablja v vojaški in letalski industriji, vendar o tem nismo našli v strokovnem tisku nobenih podatkov. Številne dobre strani zagotavljajo, da bo TMP jeklo poseglo v mnoga področja sodobne industrije.

## Literatura

1. S. J. Matas, H. Hill in HP Munger: »Ausforming and Hot-Cold Working-Methods and Properties«; Phillip H. Smith, Mechanical Working of Steel I, Gordon and Breach, New York, 1964.
2. W. E. Duckworth in P. R. Taylor: »Ausforming of high — alloy steels«; Metallurgical Developments in high-alloy steels«; JSJ Special Report No 86, London, 1964.
3. V. M. Justufsson in V. F. Zackay: »Engineering Properties of Ausformed Steels«; Metal Progress 82, dec. 1962, 111—114.
4. E. N. Sokolov, M. G. Lozinjskij in E. N. Čuprakova: »Nekatorie osobnosti mehanizma gorjačej plastičeskoj deformaciji austenitnih stalej pri visokotemperaturnoj termomehantičeskoj obrabotke«; Issledovanja po visokopročnim splavam i nitevidnim kristallam, Akademia Nauk SSSR, Moskva, 1963.
5. M. L. Bernštein in A. G. Rahštadt: »Termomehantičeskaja obrabotka resorno-pružičnih stalej i ee obratimost«; Stalj (Moskva), 1962, št. 4, 346—348.
6. D. J. Bron in J. J. Levites: »Svojstva stali 55 HGR posle VTMO i povtornoj zakaljkii«; Metallovedenie i termičeskaja obrabotka metallov (Moskva), 1966, št. 9, 45—48.
7. A. P. Guljajev in A. S. Sigarev: »Termomehantičeskaja obrabotka stali i ee vlijanie na tonkuju strukturu i mehaničeskije i svojstva«; Issledovanja po visokopročnim splavam i nitevidnim kristallam, Akad. Nauk, SSSR, Moskva, 1963.
8. F. White: »L'influence d'un traitement thermomécanique au dessus du point AC 3 sur les propriétés des aciers martensitiques«; Poročilo IRSID-a, St. Germain en Laye, maj 1967.
9. D. A. Prokoškin, J. F. Zubin in V. A. Akimov: »Vlijanie visokotemperaturnoj termomehantičeskoj obrabotki na strukturu i svojstva konstrukcionoj stali«; Issledovanja po visokopročnim splavam i nitevidnim kristallam, Akademia Nauk SSSR, Moskva, 1963.
10. D. A. Prokoškin, A. G. Vasiljeva, V. V. Akimov in Ju B. Sinkarevič: »Vlijanie temperaturi deformaciji pri TMP na mehaničeskie svojstva i porog hladnolomkosti konstrukcionoj legirovannoj stali«; Metallovedenie i termičeskaja obrabotka metallov (Moskva), 1966, št. 9, 51—54.
11. N. Dregan in M. L. Bernštein: »Visokotemperaturnaja termomehantičeskaja obrabotka burilnih trub iz legirovannoj stali 38 HNM«; Stalj (Moskva), 1966, št. 10, 944—946.
12. V. D. Kaljner, L. D. Kosovskij in M. D. Bernštein: »Termomehantičeskaja obrabotka resornih polos iz stali 55 HGR«; Stalj (Moskva), 1964, št. 3, 269—270.
13. L. Hyspecka in K. Mazanec: »Effect of Thermomechanical Treatment on the Properties of Structural Steels«; Journal of Iron and Steel Institute 205 (London), 1967, št. 12, 1261—1263.
14. L. Hyspecka in K. Mazanec: »Propriétés mécaniques des aciers après traitement thermomécanique«; Memoires Scientifiques de la Revue de Métallurgie 65 (Paris), 1968, št. 1, 17—25.
15. W. E. Duckworth: »Thermomechanical Treatment of Metals«; Journal of Metals (New York), 18, 1966, No. 8, 915—922.
16. V. V. Andrejeva, M. L. Bernštein, V. M. Zajcev, V. A. Zaimovskij, P. A. Matevosian, M. J. Sorokin in J. N. Fadejev: »Promišljennije proizvodstvo sortovogo prokata stali 40 s termomehantičeskoj obrabotkoj«; Stalj (Moskva), 1966, št. 3, 256—258.
17. M. L. Bernštein in O. M. Zueva: »Rekristalizacija mangančevih i nikeljevih stalej pri VT termomehantičeskoj obrabotke«; Metallovedenie i termičeskaja obrabotka metallov (Moskva), 1966, št. 10, 69—70.
18. D. A. Prokoškin, A. G. Rahštadt in A. S. Supov: »Vlijanie mikrolegirovanja redkimi metallami na ustojčivost termomehantičeskogo upročnjenja stali«; Stalj (Moskva), 1967, št. 3, 259—263.
19. C. W. Marshal, J. H. Gehrke, A. M. Sabrof in F. W. Boulger: Ausforging of Alloy Steels«; Journal of Metals 18 (New York), 1966, No. 3, 328—336.
20. R. Clark, J. J. Harwood: »Ausformed Steels in Automotive Applications«; Metal Progress 89, 1966, No. 3, 81—86.
21. J. P. Telang in R. Clark: »Using Ausformed Steels for Tools«; Metal Progress 90, 1966, št. 2, 87—92.
22. V. Mihčev, R. Banov in M. Kinev: »Termomehantičeskaja obrabotka instrumentalnoj stali NTTMP«; Metallovedenie i termičeskaja obrabotka metallov (Moskva), 1967, št. 9, 10—15.
23. L. P. Karpov: »Termomehantičeskaja obrabotka rastoščih rezcov«; Metallovedenie i termičeskaja obrabotka metallov (Moskva), 1966, št. 4, 69—70.
24. V. D. Sadovskij, C. N. Petrova, E. H. Sokolov, M. G. Gajdukov, D. Ja. Kazan in L. V. Smirnov: »Vlijanie visokotemperaturnoj termomehantičeskoj obrabotki na svojstva žaropročnosti metallov in splavov«; Issledovanja po visokopročnim splavam i nitevidnim kristallam. Akademia Nauk SSSR, Moskva, 1963.
25. M. G. Lozinjskij, E. N. Sokolov, Ju. P. Surkov in A. N. Romanov: »Mikrostrukturnije osobennosti visokotemperaturnogo ustalostnogo razrušenje austenitnoj stali 40 H 12 N 8 98 MB podvergnutoj VTMO«; Fizika Metallov i Metallovedenie (Sverdlovsk) 23, No. 3, 1967, 528—534.



26. M. L. Bernštein, N. Dregan, J. Ju. Korobočkin, O. S. Williams, V. H. Kurilenko i T. M. Kovaljčuk: »Vozmožnosti i perspektivi primenena termomehaničeskoj obrabotki trub«; Stalj (Moskva), 1965, št. 12, 1108—1110.
27. C. S. Carter: »Metallurgical Development in High Alloy Steels«; ISI Special Report No. 86, London, 1964.
28. M. A. Kristal in I. Ja. Rjazancev: »VTO stali St 3«; Metallovedenie i termičeskaja obrabotka Metallov (Moskva), 1966, št. 9, 28—29.
29. E. J. Dulis: »Metallurgical Development in High Alloy Steels«; ISI Special Report No. 86, London, 1964.
30. R. Perry: »Stress Corrosion Resistance of High Tensile Stainless Steels«; Metallurgical Developpement in High Alloy Steel, ISI Special Report No. 86, London, 1964.
31. A. V. Supov, D. A. Prokoškin, A. G. Rahštadt in V. A. Medvedev: »Vlijanie holodnogo naklepa na mehaničeskie svojstva i tonkuju strukturu stali podvergnutoj termomehaničeskoj obrabotke«; Stalj (Moskva), 1965, št. 9, 846—848.
32. G. T. Brown, H. J. Thomas in J. V. Hardy: »Enbrittlemen in an Ausformed 12% Chromium Steel«. Journal of the Iron and Steel Institute 203 (London), august 1964, 660—665.

## ZUSAMMENFASSUNG

Im Artikel ist eine bibliographische Analyse über den Einfluss der thermomechanischen Behandlung auf die Stahleigenschaften. Die Ergebnisse der eigenen Versuche über den Einfluss diesartiger Behandlung auf die mechanischen Eigenschaften bei höheren Temperaturen an einem Stahl von 0,3 % C, 2,9 % Si und 7,6 % Cr sind beschrieben. Die Materie ist in drei Teile geteilt. Im ersten Teil ist eine Analyse der Einflussfaktoren so wie Verformungsgrad, Verformungstemperatur, der Abkühlungsgeschwindigkeit von denen die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften abhängt, gegeben. Im zweiten Teil sind die Stahlsorten beziehungsweise die Stahlzusammensetzungen angegeben, welche für die thermomechanische

Behandlung in Betracht kommen. Im weiteren werden die vergüteten Eigenschaft, welche mit der thermomechanischen Behandlung bei den Federstählen, bei verschiedenen Werkzeugstählen und bei den temperaturbeständigen Stählen und Legierungen erreicht werden, behandelt. Im dritten Teil ist der Mikromechanismus der Aushärtung behandelt. Die Behauptungen, dass bei der Warmumformung zur Ausscheidung der Karbide im Austenit kommt, welche die Versetzungsanordnung des Austenites verfestigen, wird kritisch analysiert. Es wird angegeben aus welchen Gründen eine solche Ausscheidung nicht wahrscheinlich ist und verteidigt die Meinung, dass die Versetzungsanordnung von den Atomwolken des im Austenit aufgelösten Kohlenstoffs verankert wird.

## SUMMARY

In this paper, the author analyses bibliographical data about the influence of thermomechanical treatment on steel properties, and describes the results of his own experimentes about the influence of such treatment on mechanical properties for steel with 0,3 % C, 2,9 % Si and 7,6 % Cr at high temperatures. The paper consists of three parts. In the first part the author analyses the data for parameters of this process which have influence on the improvement of mechanical properties of steel. These parameters are the degree and temperature of treatment and cooling of steel after the treatment. In the second part compositions of steels are described which are suitable for thermomechanical treatment. Apart from this, improvement of properties obtained by thermomechanical

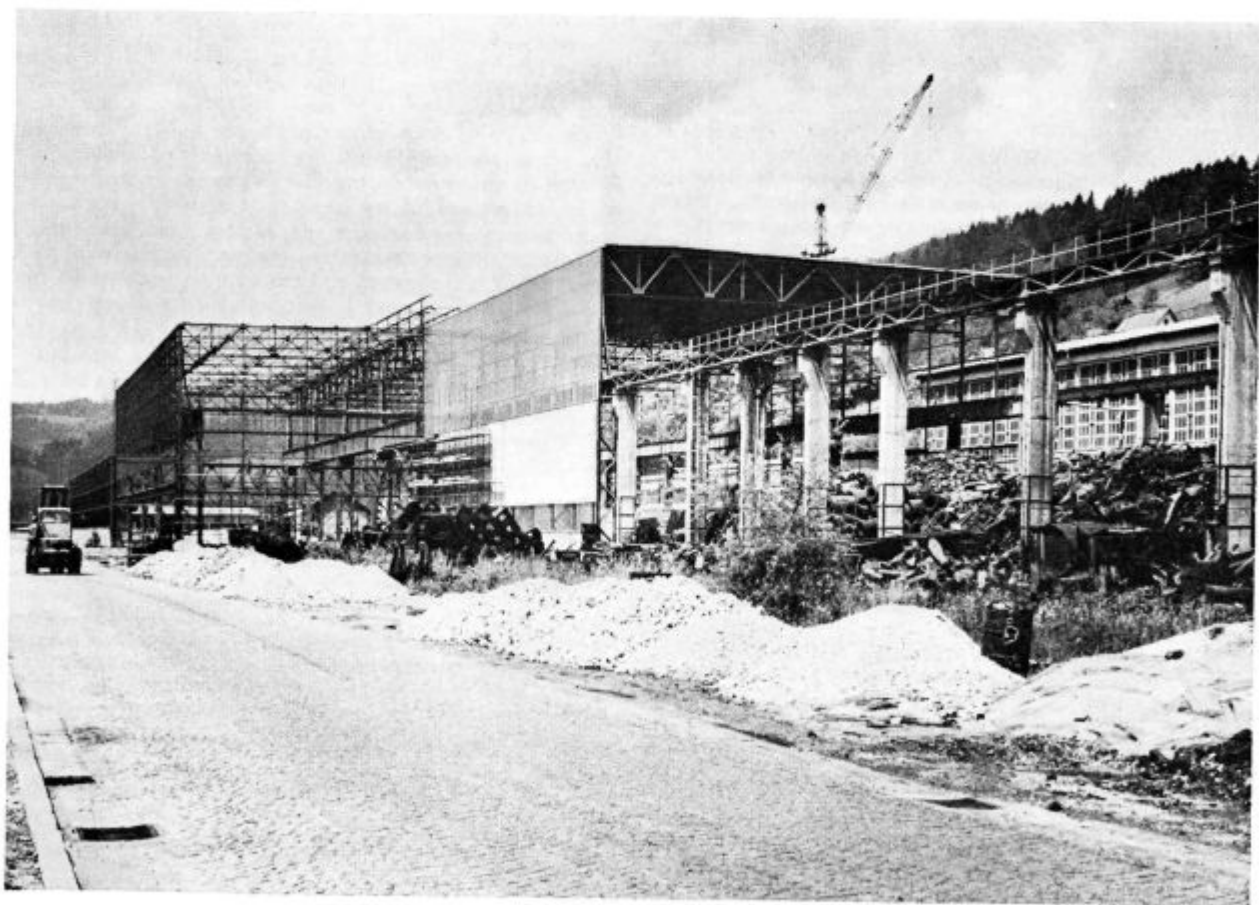
treatment of spring steel, of different tool steels, and of high-temperature steels and alloys is analysed. In the third part the hardening mechanism is discussed. A critical analysis of the statements is made that carbides and nuclei are precipitated from austenite during the treatment, and that they consolidate the arrangement of dislocations, formed in austenite during the treatment, or in processes of rearrangement of its dislocation structure during the short interval between the end of treatment and quenching of steel. Reasons are given why such precipitation does not seem to be probable, and the opinion is defended that dislocation arrangement is consolidated by atom clusters of carbon dissolved in austenite.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автор анализирует библиографию о влиянии термомеханической переработки на свойства стали и описывает результаты собственных исследований такой переработки на механические свойства стали с содержанием 0,3 % C, 2,9 % Si и 7,6 % Cr. В первой части статьи автор анализирует данные о параметрах этого метода от которых зависит улучшение механических свойств стали. Эти параметры представляют степень и температуру переработки а также и охлаждение стали после процесса. В последующий части статьи рассматривается состав сталей которые наиболее пригодны для термомеханической переработки; затем рассмотрены свойства полученные улучшением как результат термомеханической пере-

работки рессорно-пружинной стали, разных марк инструментальной стали и наковец сталей и сплавов предназначенных для употребления при высоких температурах. В третий части рассмотрен механизм устойчивости. Критически проанализирована в особенности утверждение, что во время продолжительности процесса переработки происходит выделение карбидов или зародышей в аустениту которые укрепляют устройство дислокации в коротком промежутке времени между концом переработки и закалки стали. Автор износит причины на основании которых он мнения, что такое выделение возможно и что дислокационное устройство укрепляют облака атомов углерода расплавленного в аустените.





Nova jeklarna Zelezarne Ravne med izgradnjo

## Statistična analiza regresije z uporabo elektronskih računalnikov

V članku sta opisana dva programa iz področja analize regresije. Prvi program je narejen po metodi »Korak za korakom« in določi le pomembne spremenljivke, ki ena za drugo vstopajo v regresijsko enačbo.

Program je razložen na primerih rezultatov iz elektronskega računalnika ZUSE Z-23.

Prikazani so tudi nomogrami teh primerov, ki nam grafično predočijo rezultate. Taki nomogrami so se pri raziskovalnem delu v Železarni Ravne zelo udomačili.

Drugi program izračuna običajne in parcialne koeficiente koleracije.

Tudi ta program je razložen na praktičnem primeru iz Železarne Ravne.

### UVOD

Pri modernem raziskovalnem delu z uporabo metod matematične statistike ima analiza regresije zelo pomembno vlogo<sup>1</sup>. Z njo ugotavljamo medsebojne odvisnosti in učinkovitost vplivnih faktorjev. Uporabimo jo lahko kot metodo za statistično obdelavo podatkov iz urejene dokumentacije, še bolj učinkovita pa je, če jo vključimo v strategijo planiranih raziskav<sup>2</sup>, za katere po vnaprej pripravljenem sistemu v planu raziskav zbiramo podatke in to metodo primerno kombiniramo z uporabo drugih metod matematične statistike<sup>3, 4, 5</sup>.

Najpreprostejše primere analize regresije lahko za razlago in boljše razumevanje osnovnih principov računsko izvedemo na preprost in razumljiv način. Prav uporabna pa je postala statistična analiza regresije šele s pomočjo elektronskih računal-

\* Opomba:

Program za analizo regresije na računalnikih je bil izdelan v okviru raziskovalnega projekta »Uvajanja metod matematične statistike v kontrolo kvalitete in metalurške raziskave«, ki ga v Železarni Ravne vodi Jože Rodič, dipl. inž. met., vodja metalurškega oddelka. Pri izdelavi programa za analizo regresije je neposredno sodeloval z usmerjanjem razvoja in izboljšav programa za zadovoljevanje potreb metalurških raziskav.

Avtor članka, Boštjan Rode — matematik v raziskovalnem oddelku se ob tej publikaciji zahvaljuje tov. Zvonimirju Bohtetu iz matematičnega oddelka FNT za koristne napotke pri izdelavi programa za analizo regresije »Korak za korakom« in tov. Janezu Mencingerju za posredovanje metode izračuna koeficientov parcialne korelacije, primerne za elektronski računalnik.

nikov. Ti po posebno pripravljenih programih opravijo delo, ki brez njih skoraj ni izvedljivo. Pri tem gre za veliko število spremenljivk in razne oblike nelinearnih medsebojnih odvisnosti.

Program je treba prilagoditi specialnim potrebam in ga primerno razviti. Ob primerno pripravljenem programu, zadostni kapaciteti računalnika in posebni dodatni iznajdljivosti programerja število spremenljivk in število podatkov skoraj ni omejeno.

Programi iz standardnih bibliotek računalniških sistemov največkrat zaradi svoje splošne in široko uporabne oblike ne zadovoljujejo zahtev nekaterih specialnih potreb raziskovalnega dela na določenih področjih.

V Železarni Ravne smo že v letu 1961 začeli za potrebe metalurških raziskav uvajati metodo analize regresije. Ker nismo imeli možnosti uporabe računalnika in ker matematika s programiranjem takrat še ni našla mesta v metalurških raziskavah, smo te analize opravljali po preprostem in precej poenostavljenem računskem postopku z uporabo namiznih pisarniških računskih strojev za osnovne operacije. To so bile le linearne regresije dveh spremenljivk, če pa je šlo za množično regresijo, smo nato več linearnih regresij s pomočjo regresijskih koeficientov kombinirali v enačbo množične regresije. Zaradi praktične uporabnosti smo v postopek računanja uvedli več poenostavitev, razen tega pa je bilo tako računanje izpostavljeno številnim napakam. Obseg dela je prerasel možnosti takega izračunavanja, zato smo že v prvih letih delovanja računalnika ZUSE Z-23 na Računskem centru v Ljubljani začeli iskati možnosti uporabe računalnika. Prvi korak smo ob težkem začetnem sporazumevanju metalurgov in matematikov napravili tako, da smo za postopek, ki smo ga že uporabljali, izdelali program, ki je le zamuden računski postopek zamenjal z izračunom na hitrem računalniku. Že to je pomenilo napredek, čeprav zelo skromen. Kmalu smo postali nezadovoljni z reševanjem linearnih regresij, ker je mnogo primerov, za katero je že tehnološko popolnoma jasno, da jih ni mogoče reševati s predpostavljeno linearno odvisnostjo.

Začeli smo uporabljati standardni program analize regresije na računalniku Elliot 803 v Metalurškem inštitutu Zenica.

Z letom 1967 smo v Železarni Ravne začeli z intenzivnim delom pri programiranju in širjenju uporabe računalnikov v raziskovalnem delu. Za

tako delo je potreben matematik — programer, ki je v stalnem stiku z raziskovalci in njihovimi tehničnimi problemi. S standardnim programom iz biblioteke Elliot smo kmalu postali nezadovoljni in iskali smo novih, boljših možnosti. Pri nadaljnjem delu smo uporabljali računalnike ZUSE Z 23, CDC, IBM 360/30 in IBM 1130.

V članku želimo v kratkem opisati značilnosti, teoretične osnove in praktično uporabo dveh programov za analizo regresije, ki našim potrebam metalurškega raziskovalnega dela zaenkrat najbolj ustrezata. Ta dva programa redno uporabljamo in smo z njima rešili že mnogo praktičnih problemov s področja raziskav, tehnologije proizvodnje in lastnosti jekel.

Prvi program je narejen po metodi »korak za korakom« (step by step), ki ima velike prednosti pred ostalimi metodami analize regresije v tem, da določi le pomembne regresijske koeficiente, ostalih pa sploh ne računa. Drugi program pa izračuna običajne in parcialne koeficiente korelacije, ki nam omogočijo zelo pregledno sliko medsebojnih vplivov po dveh in dveh faktorjev ne glede na stanje drugih.

V industriji je mnogo proizvodnih procesov, pri katerih so lastnosti ali količine določenih proizvodov odvisne od številnih vplivnih faktorjev, med katerimi jih nekaj kontroliramo in nekaj ne. Določen proces bomo bolj uravnavali, če bomo podrobneje spoznali velikost vpliva različnih faktorjev na kvaliteto proizvodov iz procesa. Pogosto je edini ali pa najboljši laboratorij, ki je na razpolago za študij vplivnih faktorjev, sam proizvodni proces, kjer je iz tehničnih in ekonomskih vzrokov največkrat nemogoče urediti vse potrebno za sistematični študij vsakega vplivnega faktorja. Največ, kar v takih primerih lahko naredimo, je, da med tekočo proizvodnjo zasledujemo velikost vplivnih faktorjev in kvaliteto vmesnih in končnih proizvodov. To skušamo narediti na tak način, da s tem ne preprečujemo normalnega poteka proizvodnje, ki naj bo tudi osnova raziskave.

Iz tako zbranih podatkov lahko ugotovimo zvezo med spreminjanjem velikosti vplivnih faktorjev in lastnostmi proizvodov. Metoda, ki jo pri tem uporabimo je analiza regresije.

Vrednosti določene karakteristike proizvoda, ki smo jih izmerili, vzamemo kot vrednosti odvisne spremenljivke Y. Ustrezne vrednosti vplivnih faktorjev pa so vrednosti neodvisnih spremenljivk  $X_1, X_2 \dots X_m$ . Dobiti hočemo linearno zvezo

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_mX_m \quad (1)$$

Pri tem so  $b_1, b_2 \dots b_m$  regresijski koeficienti, ki naj nam povedo, kako sprememba vsakega vplivnega faktorja X vpliva na spremembo vrednosti opazovane karakteristike proizvoda — spremenljivke Y.

V enačbi je  $b_0$  konstantna vrednost spremenljivke Y, ki ni pojasnjena s spreminjanjem X-ov v enačbi (1). Enačbo (1) imenujemo regresijska zveza ali enačba regresije.

Iz zbranih podatkov za vrednosti odvisne in neodvisnih spremenljivk z metodo analize regresije vedno lahko določimo regresijske koeficiente b. Vprašanje je le, ali zveza, ki smo jo tako dobili med vplivnimi faktorji in kvaliteto proizvoda, res obstaja, ali pa smo dobili take vrednosti za koeficiente b, čeprav zveze, ki jo le-ti določajo, v resnici ni. Kakor temu pravimo, ugotoviti hočemo statistično pomembnost regresijske zveze. V praksi navadno smatramo da je rezultat uporaben, če je verjetnost, da nastopi le zaradi slučaja, manjša od 5 %. Tak rezultat imenujemo tudi 95 % pomemben, ali dobljen na 5 % nivoju pomembnosti.

Podobno lahko dobimo tudi, da je rezultat 99 % pomemben ali 99,9 % pomemben, če je verjetnost, da nastopi le zaradi slučaja samo 1 % ali samo 0,1 %.

Pri izbiri vplivnih faktorjev za neodvisne spremenljivke moramo paziti, da nobeden med njimi ne vpliva na kateri drug izbran vplivni faktor, ker sicer ne moremo prav določiti pomembnosti regresijske zveze. S posebno metodo parcialnih koeficientov korelacije moremo določiti tiste pare vplivnih faktorjev, kjer vrednost enega faktorja močno vpliva na vrednost drugega. Potem enega od obeh faktorjev v paru ne vzamemo med neodvisne spremenljivke.

V tej publikaciji si bomo ogledali uporabo dveh programov za analizo regresije na elektronskem računalniku. Namen prvega programa je samo določitev pomembnih regresijskih koeficientov, medtem ko nepomembne vzamemo enake 0. Z drugim programom pa lahko izračunamo le vse regresijske koeficiente skupaj in parcialne koeficiente korelacije med posameznimi spremenljivkami.

## POMEN REGRESIJSKE ZVEZE

Vzemimo, da imamo podatke za analizo regresije zbrane v tabeli,

$X_1$	$X_2$	. . . . .	$X_s$
$x_{11}$	$x_{21}$		$x_{s1}$
$x_{12}$	$x_{22}$		$x_{s2}$
.	.		.
.	.		.
.	.		.
$x_{1n}$	$x_{2n}$		$x_{sn}$

Tabela 1

kjer so  $X_1, X_2, \dots X_s$  spremenljivke,  $x_{ij}$  pa njihove vrednosti. Vsaka spremenljivka ima v praksi tudi svoje ime, kot npr.: trdota, žilavost, ogljik, temperatura popuščanja ... in enoto: HRC, kpm/cm<sup>2</sup>, %, °C ...

Vrednosti  $x_{ij}$  so v praksi števila, ki smo jih izmerili za vsako opazovano karakteristiko — spremenljivko.



V isti vrsti leže števila, izmerjena v isti enoti proizvodnega procesa. Primer proizvodnega procesa je npr.: proizvodnja določene vrste jekla. Števila, izmerjena za opazovane karakteristike (dotatki legur, temperatura izpusta, trdota...) v isti šarži, bi ležala v isti vrsti tabele 1. Število vrst n pa je potem enako številu šarž.

Med spremenljivkami  $X_1, X_2, \dots, X_m$ , ki jih imenujemo tudi prvotne, lahko predpostavimo najrazličnejše zveze. Tisto izmed spremenljivk, ki jo vzamemo za odvisno, bomo označili z  $Y$ . Neodvisne spremenljivke pa bomo zaradi enostavnosti zapisa formul označili kar po vrsti z  $X_1, X_2, \dots, X_m$ , čeprav so to lahko katerekoli od prvotnih spremenljivk ali celo njihovi logaritmi, recipročne vrednosti ali produkti. Vzemimo za primer, da smo predpostavili odvisnost

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_1^2 + b_3 \ln X_2 + b_4 \frac{1}{X_3} + b_5 \cdot \frac{1}{X_3 \cdot \ln X_2}$$

Neodvisne spremenljivke, ki jih zaradi enostavnosti označimo z  $X_1, X_2, \dots, X_5$ , so tu po vrsti

$$X_1, X_1^2, \ln X_2, \frac{1}{X_3}, \frac{1}{X_3 \cdot \ln X_2}$$

Zgornjo enačbo bi s tem dogovorom enostavno zapisali:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^5 b_i X_i$$

Vrednosti odvisne spremenljivke označimo z  $y_1, y_2, \dots, y_n$  in poljubno vrednost med njimi z  $y_j$ .

Kako bomo v enačbi (1) določili regresijske koeficiente  $b_1, b_2, \dots, b_m$  in konstanto  $b_0$ ?

Vzemimo, da jih že poznamo. Z  $\hat{y}_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$  označimo vrednosti spremenljivke  $Y$ , ki jih izračunamo iz regresijske zveze (1) tako, da za neodvisne spremenljivke  $X_1, X_2, \dots, X_m$  vstavimo njihove vrednosti iz tabele 1.

$$\hat{Y}_j = b_0 + b_1 x_{1j} + b_2 x_{2j} \dots + b_m x_{mj} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

Želimo, da bi bile razlike med  $y_j$  in  $\hat{y}_j$  čim manjše. Ta pogoj napišemo takole:

$$\sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_j)^2 = \text{minimum} \quad (3)$$

Regresijske koeficiente  $b_1, b_2, \dots, b_m$  in konstanto  $b_0$  določimo tako, da je pogoj (3) izpolnjen. Pravimo, da smo jih določili po metodi najmanjših kvadratov. Seveda ni nujno, da regresijske koeficiente določimo prav na ta način. Lahko nekatere kar predpostavimo enake nič, druge pa določimo po metodi najmanjših kvadratov. Posebno metodo določitve bomo spoznali kasneje pri opisu programa. Ko poznamo regresijske koeficiente in konstanto, lahko izračunamo vrednosti  $\hat{y}_j$  za vse  $j = 1, 2, \dots, n$  in nato še levo stran enačbe (3), ki jo bomo označili z  $V$  in jo imenujemo **nepojasnjena varianca** ali vsota kvadratov odstopanj od regresijskih vrednosti.

$$V = \sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_j)^2 \quad (4)$$

Nepojasnjena jo imenujemo zato, ker odstopanja nismo pojasnili z regresijsko zvezo.

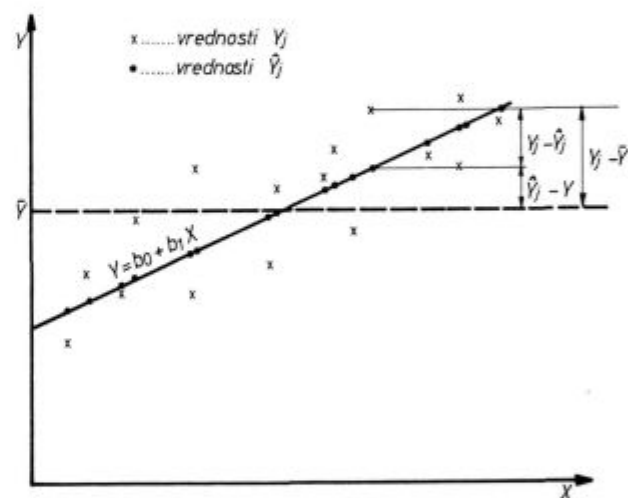
Srednjo vrednost vseh vrednosti  $y_j$  označimo z  $\bar{y}$ . Izračunamo lahko vsoto kvadratov odstopanj od srednje vrednosti.

$$K = \sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2 \quad (5)$$

Vrednost  $K$  imenujemo tudi **totalna ali celotna varianca**. Razliko vrednosti  $K - V$  imenujemo **pojasnjena varianca**. Zakaj to ime? Dokazali bi lahko, da je

$$K - V = \sum_{j=1}^n (\hat{y}_j - \bar{y})^2 \quad (6)$$

kar je vsota kvadratov odstopanj regresijskih vrednosti od srednje vrednosti.



Slika 1  
Analiza regresije

Na sliki 1 si v preprostem primeru regresijske enačbe  $y = b_0 + b_1 X$  lahko predstavljamo pomen vseh treh varianc. Totalna varianca nam meri skupno odstopanje izmerjenih točk (označenih z  $x$ ) črtkaste premice — povprečja. Nepojasnjena varianca nam meri skupno odstopanje točk na regresijski premici (označenih s  $\cdot$ ) od izmerjenih točk.

Pojasnjena varianca pa nam meri odstopanje točk na regresijski premici (prej imenovane regresijske vrednosti) od črtkaste premice.

Razmerje pojasnjene in totalne variance imenujemo **determinacijski koeficient** in ga označimo z  $R^2$ .



$$R^2 = \frac{K - V}{K} = 1 - \frac{V}{K} \quad (7)$$

Determinacijski koeficient nam pove, kakšen del celotnega razširjanja vrednosti smo pojasnili z enačbo regresije. Kvadratni koren iz determinacijskega koeficienta imenujemo **koeficient množične korelacije R**. Ta nam meri jakost regresijske zveze. Njegova vrednost leži med 0 in 1. Če je  $R = 0$ , pravimo, da med odvisno spremenljivko in neodvisnimi ni zveze, ki smo jo predpostavili. V praksi ne bo  $R$  nikoli 0, pač pa je lahko zelo majhen. Seveda pa je  $R = 0$ , če vzamemo vse regresijske koeficiente enake 0. Pri  $R = 1$ , pravimo, da je odvisnost popolna. Tudi tega primera v praksi nikoli ne dosežemo, vendar se veselimo primerov z velikimi  $R$ , ker nam pojasnijo medsebojne odvisnosti in jakosti vplivov.

Zanima nas tudi pomembnost regresijske enačbe, o čemer smo že govorili. Pomembnost vseh regresijskih koeficientov skupaj ugotovimo s tako imenovanim **F — testom**. Izračunati moramo vrednost

$$R = \frac{R^2 (n - m - 1)}{m (1 - R^2)} \quad (8)$$

$m$  = število neodvisnih spremenljivk

$n$  = število podatkov za vsako spremenljivko

Nato pogledamo v tabele<sup>4</sup> za funkcijo  $F\alpha$ ;  $v_1, v_2$  za željen nivo pomembnosti (npr.:  $\alpha = 5$ ) in prostostni stopnji  $v_1 = m$  in  $v_2 = n - m - 1$ . Če je vrednost iz tabel manjša od vrednosti, izračunane po obrazcu (8), potem je enačba regresije  $(100 - \alpha)$  % pomembna (npr.: 95 % pomembna). V primeru 95 % pomembnosti primerjamo vrednost  $F$ , izračunano po obrazcu (8) še z vrednostjo iz tabel za  $\alpha = 1$ . Tako ugotovimo, ali je enačba regresije tudi 99 % pomembna. V primeru, ko pa ni 95 % pomembnosti, primerjamo izračunani  $F$  še z vrednostjo iz tabel za  $\alpha = 10$ . Nivo pomembnosti, ki ga izberemo za primerjavo zavisi od primera do primera in je odvisen tudi od naših izkušenj. Če nismo ugotovili pomembnosti regresijske zveze, pa s tem še ni rečeno, da te zveze v resnici ni. Lahko so bili le naši podatki tako slabi, da je z večjo gotovostjo nismo mogli odkriti. Morda bi s ponovnim pazljivim zbiranjem zadostnega števila podatkov lahko odkrili, da je že prej predpostavljena regresijska zveza pomembna — to je gotova.

#### PROGRAM »KORAK ZA KORAKOM« ZA ANALIZO REGRESIJE<sup>5</sup>

To je program, za katerega smo v uvodu rekli, da določi le pomembne regresijske koeficiente. Uporabnost programa si bomo ogledali na praktičnem primeru v splošni obliki. Zbranih imamo po 30 vrednosti v obliki tabele 1 za 19 spremenljivk ( $n = 30, s = 19$ )  $X_1, X_2, \dots, X_{19}$ . Poleg tega imamo

tudi seznam funkcijskih odvisnosti, ki jih predpostavimo glede na praktične izkušnje in jih želimo kvantitativno spoznati.

#### Plan analize regresije — praktičen primer

$$\begin{aligned} X_2 &= f(X_1, X_3, X_4, X_6, X_8, X_9, X_{11}) \\ X_2' &= f(X_{12}, \dots, X_{19}) \\ X_3 &= f(X_1) \\ X_4 &= f(X_1) \\ X_5 &= f(X_1) \\ X_6 &= f(X_1, X_3, X_4) \\ X_7 &= f(X_2, X_3, X_4, X_6, X_8, X_9, X_{11}) \\ X_7' &= f(X_{12}, \dots, X_{19}) \\ X_8 &= f(X_2, X_3, X_4, X_6, X_7, X_9, X_{11}) \\ X_8' &= f(X_{12}, \dots, X_{19}) \\ X_9 &= f(X_2, X_3, X_4, X_6, X_7, X_8, X_{11}) \\ X_9' &= f(X_{12}, \dots, X_{19}) \\ X_{11} &= f(X_2, \dots, X_4, X_6, \dots, X_9) \\ X_{11}' &= f(X_{12}, \dots, X_{19}) \\ X_{16} &= f(X_7, X_8) \\ X_{16}' &= f(X_{12}, \dots, X_{15}, X_{17}, \dots, X_{19}) \\ X_{17} &= f(X_7, X_8) \\ X_{17}' &= f(X_{12}, \dots, X_{16}, X_{18}, X_{19}) \\ X_{18} &= f(X_3, X_4, X_5, \dots, X_9, X_{11}) \\ X_{18}' &= f(X_{12}, \dots, X_{17}, X_{19}) \\ X_{19} &= f(X_1, X_2) \\ X_{12} &= (X_1, \dots, X_4, X_6, \dots, X_9, X_{11}, X_{16}, X_{17}, X_{19}) \\ X_{13} &= f(X_3, X_5, X_6, X_8, X_{19}) \\ X_{15} &= f(X_{19}) \end{aligned}$$

V seznamu opazimo, da so nekatere spremenljivke dvakrat odvisne, vedno od druge skupine neodvisnih spremenljivk. Zato za take odvisne spremenljivke nekatere uporabimo ' poleg njihovega simbola  $X$ .

Določiti moramo še oblike funkcijskih zvez. V našem primeru naj bodo to polinomi druge stopnje brez mešanih produktov spremenljivk. Tako iščemo v tem primeru odvisnost npr.:

$$\begin{aligned} X_6 &= f(X_1, X_3, X_4) \text{ v obliki} \\ X_6 &= b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_3 + b_3 X_4 + b_4 X_1^2 + \\ &+ b_5 X_3^2 + b_6 X_4^2 \end{aligned} \quad (9)$$

V računalnik bomo podali podatke tako, da se bo ta po programu pripravil na izračun vseh 24 regresijskih enačb iz seznama. Zato bo moral najprej izračunati kvadrate vrednosti spremenljivk

$$X_1, X_2, \dots, X_9, X_{11}, X_{12}, \dots, X_{19}$$

( $X_{10}$  ne nastopa nikjer v seznamu funkcijskih odvisnosti, zato kvadratov njenih vrednosti računalnik ne potrebuje, čeprav imamo  $X_{10}$  v podatkih.) Teh  $18 \times 30$  kvadratov bo računalnik shranil v spomin naprej od  $19 \times 30$  vrednosti prvotnih spremenljivk. Tako bo vrstni red spremenljivk za računalnik naslednji:

Tabela 2

1'	X <sub>1</sub>
2'	X <sub>2</sub>
3'	X <sub>3</sub>
.	.
.	.
19'	X <sub>19</sub>
20'	X <sub>1</sub> <sup>2</sup>
21'	X <sub>2</sub> <sup>2</sup>
22'	X <sub>3</sub> <sup>2</sup>
23'	X <sub>4</sub> <sup>2</sup>
24'	X <sub>5</sub> <sup>2</sup>
25'	X <sub>6</sub> <sup>2</sup>
26'	X <sub>7</sub> <sup>2</sup>
27'	X <sub>8</sub> <sup>2</sup>
28'	X <sub>9</sub> <sup>2</sup>
29'	X <sub>11</sub> <sup>2</sup>
30'	X <sub>12</sub> <sup>2</sup>
31'	X <sub>13</sub> <sup>2</sup>
32'	X <sub>14</sub> <sup>2</sup>
33'	X <sub>15</sub> <sup>2</sup>
34'	X <sub>16</sub> <sup>2</sup>
35'	X <sub>17</sub> <sup>2</sup>
36'	X <sub>18</sub> <sup>2</sup>
37'	X <sub>19</sub> <sup>2</sup>

To moramo imeti stalno pred očmi, tako za določitev odvisne in neodvisnih spremenljivk vsake funkcijske zveze, kot tudi za kasnejše tolmačenje rezultatov. Npr.: za funkcijsko zvezo  $X_6 = f(X_1, X_3, X_4)$  računalniku določimo odvisno spremenljivko s številko 6', neodvisne spremenljivke pa določimo s števili 1' 3' 4' 20' 22' 23', ki nastopajo tudi v rezultatih poleg regresijskih koeficientov  $b_1, b_2 \dots b_6$  iz enačbe (9). Tako je npr. koeficient  $b_6$  v rezultatih določen s številko 23'.

Podatke za računalnik pripravimo v posebni obliki tako, da računalniku »povemo«, kaj naj z njimi naredi, preden začne računati regresijske koeficiente za posamezne funkcijske zveze.

Računalnik računa regresijske koeficiente enega za drugim. V začetku so vsi enaki nič, kar pomeni, da nobene neodvisne spremenljivke ni v regresijski enačbi. Nato vstopajo spremenljivke ena za drugo v regresijsko enačbo in ustrezni koeficienti dobijo vrednosti različne od nič. Vsak vstop spremenljivke v regresijsko enačbo in izračun vseh regresijskih koeficientov za spremenljivke, ki so že v regresijski enačbi, imenujemo korak v računanju. V vsakem koraku vstopi spremenljivka, ki najbolj zmanjša nepojasnjeno varianco. Vstopajo spremenljivke samo toliko časa, dokler je njihov doprinos k zmanjšanju nepojasnjene variance pomemben.

Po nekaj korakih določena spremenljivka, ki je prej vstopila, lahko tudi izstopi iz regresijske enačbe, če njen doprinos k pojasnjeni varianci ni več pomemben. To pomembnost pri vstopu in izstopu spremenljivk urejata dve števili  $F_1$  in  $F_2$ , ki ju navadno vzamemo obe 4, kar ustreza 95 % po-

membnosti v primerih, ko je število podatkov za eno spremenljivko vsaj 30. Pri manjšem številu podatkov moramo  $F_1$  povečati. Na koncu tega članka je tabela 3 za  $F_{\alpha}$ ; 1, v iz katerih dobimo našo vrednost  $F_1$  za določen nivo pomembnosti

Slika 2

Protokol rezultatov analize regresije za odvisnost  
 $X_6 = f(X_1, X_3, X_4, X_5, X_7, X_8, X_{11})$

## KONTROLNE VSOTE

.44826000 <sub>10</sub> +06	.152400000 <sub>10</sub> +04	.500700000 <sub>10</sub> +04
.136210000 <sub>10</sub> +05	.112969999 <sub>10</sub> +03	.208000000 <sub>10</sub> +02
.133199999 <sub>10</sub> +01	.445100000 <sub>10</sub> +02	

F1= .400000<sub>10</sub>+01F2= .400000<sub>10</sub>+01STD. DEV. Y .358853<sub>10</sub>-00

1'

VSTOPA X 8'

IZRACUNANI F .143925<sub>10</sub>+03STD. DEV. Y .147382<sub>10</sub>-00KONSTANTA .880516<sub>10</sub>-00

SPREM. KOEFICIENT STD. NAP. KOEF.

8' .869928<sub>10</sub>-00 .727128<sub>10</sub>-01

KOEf. DET. KOEF. KOREL.

.837138<sub>10</sub>-00 .914952<sub>10</sub>-00

2'

VSTOPA X 11'

IZRACUNANI F .685124<sub>10</sub>+01STD. DEV. Y .134040<sub>10</sub>-00KONSTANTA .111846<sub>10</sub>+01

SPREM. KOEFICIENT STD. NAP. KOEF.

8' .818978<sub>10</sub>-00 .687614<sub>10</sub>-0111' -.456370<sub>10</sub>+01 .174354<sub>10</sub>+01

KOEf. DET. KOEF. KOREL.

.870100<sub>10</sub>-00 .932791<sub>10</sub>-00

3'  
 VSTOPA X 29'  
 IZRACUNANI F .863822<sub>10</sub>+01  
 STD. DEV. Y .118342<sub>10</sub>-00

KONSTANTA .168195<sub>10</sub>+01

SPREM. KOEFICIENT	STD. NAP. KOEF.
8' .792119 <sub>10</sub> -00	.613923 <sub>10</sub> -01
11' -.276481 <sub>10</sub> +02	.800370 <sub>10</sub> +01
29' .219666 <sub>10</sub> +03	.747398 <sub>10</sub> +02

KOEF. DET.	KOEF. KOREL.
.902495 <sub>10</sub> -00	.949997 <sub>10</sub> -00

4'  
 VSTOPA X 7'  
 IZRACUNANI F .656314<sub>10</sub>+01  
 STD. DEV. Y .107403<sub>10</sub>-00

KONSTANTA .189306<sub>10</sub>-00

SPREM. KOEFICIENT	STD. NAP. KOEF.
7' .394532 <sub>10</sub> -00	.154002 <sub>10</sub> -00
8' .758644 <sub>10</sub> -00	.572315 <sub>10</sub> -01
11' -.271463 <sub>10</sub> +02	.726683 <sub>10</sub> +01
29' .223281 <sub>10</sub> +03	.678489 <sub>10</sub> +02

KOEF. DET.	KOEF. KOREL.
.922770 <sub>10</sub> -00	.960609 <sub>10</sub> -00

5'  
 VSTOPA X 26'  
 IZRACUNANI F .453595<sub>10</sub>+01  
 STD. DEV. Y .100533<sub>10</sub>-00

KONSTANTA -.304702<sub>10</sub>+02

SPREM. KOEFICIENT	STD. NAP. KOEF.
7' .169999 <sub>10</sub> +02	.779812 <sub>10</sub> +01
8' .762020 <sub>10</sub> -00	.535919 <sub>10</sub> -01
11' -.316193 <sub>10</sub> +02	.711058 <sub>10</sub> +01
26' -.223768 <sub>10</sub> +01	.105066 <sub>10</sub> +01
29' .268238 <sub>10</sub> +03	.669226 <sub>10</sub> +02

KOEF. DET.	KOEF. KOREL.
.935046 <sub>10</sub> -00	.966977 <sub>10</sub> -00

$\alpha = 10; 5; 1; 0,1$ , če za  $v$  vzamemo število podatkov  $n$  za eno spremenljivko minus 2 ( $v = n - 2$ ).  $F_2$  izberemo tako, da je  $F_1 \geq F_2$ .

Poglejmo si rezultate za funkcijsko zvezo  $X_9 = f(X_2, X_3, X_4, X_6, X_7, X_8, X_{11})$  na sliki 2. Pod naslovom »Kontrolne vsote« so najprej vsote vseh vrednosti neodvisnih spremenljivk  $X_2, X_3, X_4, X_6, X_7, X_8, X_{11}$  in nazadnje vsota odvisne spremenljivke  $X_9$ , torej vsega skupaj 8 vsot. Za vsotami sledita izpisani vrednosti  $F_1$  in  $F_2$ , ki smo jih določili s podatki.

Sledi standardna deviacija odvisne spremenljivke, ki jo računalnik označi z naslovom »STD. DEV. Y«. Nato imamo izpise v vsakem koraku. Najprej zaporedno številko koraka, nato spremenljivka, ki vstopa v regresijsko enačbo oziroma izstopa iz nje, opremljena z napisom »VSTOPA« oziroma »IZSTOPA«. Sledi izračunana vrednost  $F$ , ki jo je računalnik primerjal z  $F_1$  oziroma  $F_2$ . »IZRACUNANI F«, kot piše pred to vrednostjo, je pri vstopu vedno večji od  $F_1$  in pri izstopu vedno manjši od  $F_2$ . Potem računalnik izpiše še standardno deviacijo odvisne spremenljivke, vendar sedaj ne več glede na srednjo vrednost  $\bar{Y}$ , temveč glede na vrednosti  $\hat{y}_j$ , ki jih že poznamo (npr.: iz enačbe (2), kjer so  $b_0, b_1 \dots b_m$  koeficienti spremenljivk, ki so vključno s tem korakom že vstopile v regresijsko enačbo). Tako od koraka do koraka zasledujemo manjšanje te vrednosti, ko spremenljivke vstopajo. Vrednost pa se le nepomembno poveča, ko katera od spremenljivk izstopi.

Po manjšem presledku sledi še izpis v istem koraku. Zraven napisa »KONSTANTA« izpiše računalnik vrednost  $b_0$ . Pod napisom »SPREM.« dobimo števila, ki v smislu tabele 2 določajo spremenljivke, za katere slede pod napisom »KOEFCIENT« regresijski koeficienti. Pod napisom »STD. NAP. KOEF.« dobimo standardne napake teh regresijskih koeficientov.

V vsakem koraku računalnik izpiše še trenutni koeficient determinacije  $R^2$  pod napisom »KOEFC. DET.« in koeficient korelacije  $R$  pod napisom »KOEFC. KOREL.« Z vstopanjem spremenljivk se tudi ta dva koeficienta večata. Pri izstopu spremenljivke pa se navadno le neznatno zmanjšata.

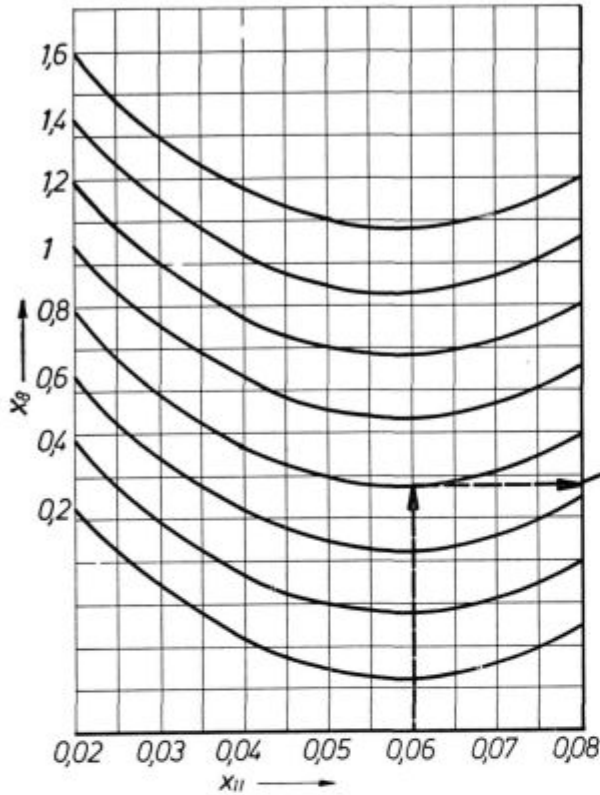
V našem primeru  $X_9 = f(X_2, X_3, X_4, X_6, X_7, X_8, X_{11})$  je najprej vstopila spremenljivka  $X_8$  z zelo velikim izračunanim  $F = 144$  (zaokroženo na 3 mesta). Standardna deviacija odvisne spremenljivke se je zmanjšala na polovico iz 0,36 na 0,15. Koeficient determinacije je že v prvem koraku velik 0,84. Koeficient korelacije je z vrednostjo 0,915 tako že blizu 1.

V 2., 3., 4. in 5. koraku vstopajo po vrsti spremenljivke  $X_{11}, X_{11}^2$  (z oznako 29' po tabeli 2!)  $X_7$  in  $X_7^2$  (z oznako 26'). Standardna deviacija  $X_9$  se je zmanjšala do konca na 0,10 in koeficient determinacije je narastel na 0,94. Končna enačba regresije bi bila:  $X_9 = -30,47 + 17 X_7 - 2,238 X_7^2 + 0,762 X_8 - 31,62 X_{11} + 268,2 X_{11}^2$ . (10)

Ker je v 5. koraku izračunani  $F = 4,5$ , moremo za to enačbo trditi le, da je 95 % pomembna. Po 1. koraku imamo regresijsko odvisnost  $X_9 = 0,8805 + 0,8699 X_6$ , ki je 99,9 % pomembna, ker je izračunani  $F$  enak 144.

Pomembnost regresijske zveze v določenem koraku dobimo tako, da do vključno tega koraka poiščemo najmanjši izračunani  $F$  pri vstopu spre-

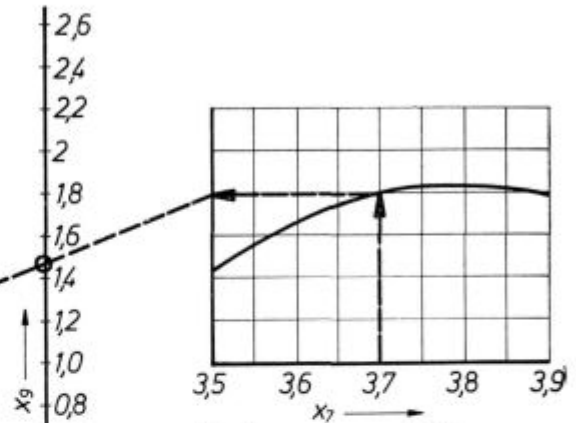
menljivke in ga primerjamo z vrednostjo  $F_{\alpha, 1, v}$  iz tabele 3 za določen nivo  $\alpha$  in  $v = n - 2$ . Če je najmanjši izračunani  $F$  večji od vrednosti iz tabele, potem je regresijska enačba v tem koraku  $(100 - \alpha) \%$  pomembna. V našem primeru ni nobena regresijska enačba, razen prve več kot 95 % pomembna, ker je vrednost v tabeli 3 za  $F_1$ ;  $1,28 = 7,64$  (glej tabele na koncu članka).



$$X_9 = f(X_2, X_3, X_4, X_6, X_7, X_8, X_{11})$$

$$R^2 = 0,94 \quad R = 0,97 \quad \alpha = 5$$

$$S_y = 0,10 \quad x_9 \pm 0,2$$



Primer:  $x_7 = 3,7$   
 $x_8 = 0,8$   
 $x_{11} = 0,06$   


---

 $x_9 = 1,5$

Slika 3  
Primer nomograma za tri pomembne spremenljivke

Regresijsko enačbo (10) narišemo v nomogramu na sliki 3.

V nomogramu je narisani primer, kako iz vrednosti neodvisnih spremenljivk  $X_7$ ,  $X_8$  in  $X_{11}$  dobimo vrednost odvisne spremenljivke  $X_9$ . Na sliki so vpisane tudi vrednosti koeficientov  $R^2$  in  $R$ , nivo pomembnosti ( $\alpha = 5$ ), standardna deviacija odvisne spremenljivke  $S_y$  in območje 95 % gotovosti  $X_9 \pm 0,2$ . (To je približno  $X_9 \pm 1,96 \cdot S_y$ .) Pas 95 % gotovosti pomeni, da le s 5 % verjetnostjo lahko pričakujemo dejansko vrednost odvisne spremenljivke zunaj mej  $X_9 + 0,2$  in  $X_9 - 0,2$ , če za  $X_9$  vzamemo vrednost, dobljeno iz nomograma. Tako je v našem primeru le 5 % verjetnosti, da dejanska vrednost  $X_9$ , ki bi jo izmerili v proizvodnem procesu pri vrednostih  $X_7 = 3,7$ ,  $X_8 = 0,8$  in  $X_{11} = 0,06$  leži zunaj mej 1,3 in 1,7. Polovično širino pasu 95 % gotovosti izračunamo tako, da  $S_y$  pomnožimo z 1,96. V našem primeru  $0,10 \cdot 1,96 = 0,20$ , če zaokrožimo na 2 decimalki. Taka določitev tolerančnega območja je le približna in prav dobro upo-

Slika 4  
Protokol rezultatov analize regresije za odvisnost  $x_{11} = f(x_7, x_8)$

KONTROLNE VSOTE			
.112969999 <sub>10</sub> +03	.208000000 <sub>10</sub> +02	.274999999 <sub>10</sub> +02	
F1= .400000 <sub>10</sub> +01			
F2= .400000 <sub>10</sub> +01			
STD. DEV. Y	.295347 <sub>10</sub> -00		
KONSTANTA	.916666 <sub>10</sub> -00		
SPREM. KOEFICIENT		STD. NAP. KOEF.	
KOEF. DET.		KOEF. KOREL.	
0		0	



rabna, čeprav ne ustreza popolnoma teoriji, ki je dosti bolj zapletena. Iz nomograma se vidi tudi jakost vpliva posamezne neodvisne spremenljivke. V našem primeru očitno najbolj vpliva spremenljivka  $X_8$ , najmanj pa  $X_7$ . To se ujema tudi z vrstnim redom vstopanja spremenljivk v regresijsko enačbo.

Oglejmo si še primer rezultatov za funkcijsko zvezo  $X_{16} = f(X_7, X_8)$  na sliki 4. Nobena od spremenljivk  $X_7, X_7^2, X_8, X_8^2$  ni vstopila v regresijsko enačbo, zato so vsi regresijski koeficienti ostali enaki 0 in iz računalnika ne dobimo nobene zapisa. Konstanta je srednja vrednost odvisne spremenljivke  $X_{16}$ , o čemer se prepričamo tudi, če zadnjo kontrolno vsoto delimo s številom podatkov 30.

$$27 \lambda : 30 = 0,916666 \dots$$

Koeficienta determinacije in korelacije sta enaka 0.

Zanimivi so tudi rezultati za funkcijsko zvezo  $X_{17} = f(X_{12}, \dots, X_{16}, X_{18}, X_{19})$  na sliki 5.

Slika 5

Protokol rezultatov analize regresije za odvisnost  
 $X_{17} = f(X_{12}, \dots, X_{16}, X_{18}, X_{19})$

KONTROLNE VSOTE

.113760999 <sub>10</sub> +04	.528549999 <sub>10</sub> +03	.958820000 <sub>10</sub> +03
.281820000 <sub>10</sub> +03	.274999999 <sub>10</sub> +02	.934000000 <sub>10</sub> +01
.223500000 <sub>10</sub> +06	.122050000 <sub>10</sub> +03	

F1= .400000<sub>10</sub>+01

F2= .400000<sub>10</sub>+01

STD. DEV. Y .890397<sub>10</sub>-00

1'

VSTOPA X 31'

IZRACUNANI F .163049<sub>10</sub>+02

STD. DEV. Y .720371<sub>10</sub>-00

KONSTANTA .817038<sub>10</sub>+01

SPREM. KOEFICIENT	STD. NAP. KOEF.
31' -.131605 <sub>10</sub> -01	.325921 <sub>10</sub> -02

KOEF. DET.	KOEF. KOREL.
.360016 <sub>10</sub> -00	.606643 <sub>10</sub> -00

2'

VSTOPA X 14'

IZRACUNANI F .158183<sub>10</sub>+02

STD. DEV. Y .582533<sub>10</sub>-00

KONSTANTA .181209<sub>10</sub>+02

SPREM. KOEFICIENT	STD. NAP. KOEF.
14' -.295160 <sub>10</sub> -00	.742127 <sub>10</sub> -01
31' -.148445 <sub>10</sub> -01	.266938 <sub>10</sub> -02

KOEF. DET.	KOEF. KOREL.
.601400 <sub>10</sub> -00	.775557 <sub>10</sub> -00

3'

VSTOPA X 15'

IZRACUNANI F .363296<sub>10</sub>+02

STD. DEV. Y .383402<sub>10</sub>-00

KONSTANTA .280381<sub>10</sub>+02

SPREM. KOEFICIENT	STD. NAP. KOEF.
14' -.473078 <sub>10</sub> -00	.571305 <sub>10</sub> -01
15' -.626735 <sub>10</sub> -00	.103980 <sub>10</sub> -00
31' -.177121 <sub>10</sub> -01	.182016 <sub>10</sub> -02

KOEF. DET.	KOEF. KOREL.
.833766 <sub>10</sub> -00	.913108 <sub>10</sub> -00

4'

VSTOPA X 12'

IZRACUNANI F .265459<sub>10</sub>+02

STD. DEV. Y .272298<sub>10</sub>-00

KONSTANTA .596403<sub>10</sub>+02

SPREM. KOEFICIENT	STD. NAP. KOEF.
12' -.567408 <sub>10</sub> -00	.110145 <sub>10</sub> -00
14' -.789683 <sub>10</sub> -00	.611675 <sub>10</sub> -01
15' -.771441 <sub>10</sub> -00	.790091 <sub>10</sub> -01
31' -.198897 <sub>10</sub> -01	.136005 <sub>10</sub> -02

KOEF. DET.	KOEF. KOREL.
.919376 <sub>10</sub> -00	.958841 <sub>10</sub> -00

5'  
 VSTOPA X 33'  
 IZRACUNANI F .899399<sub>10</sub>+01  
 STD. DEV. Y .237026<sub>10</sub>-00

KONSTANJA .706764<sub>10</sub>+02

SPREM.	KOEFICIENT	STD. NAP.	KOEF.
12'	-.607730 <sub>10</sub> -00	.968116 <sub>10</sub> -01	
14'	-.718017 <sub>10</sub> -00	.533313 <sub>10</sub> -01	
15'	-.347247 <sub>10</sub> +01	.903268 <sub>10</sub> -00	
31'	-.196366 <sub>10</sub> -01	.118600 <sub>10</sub> -02	
33'	.193349 <sub>10</sub> -00	.644714 <sub>10</sub> -01	

KOEF. DET. .941353<sub>10</sub>-00  
 KOEF. KOREL. .970233<sub>10</sub>-00

6'  
 VSTOPA X 16'  
 IZRACUNANI F .735290<sub>10</sub>+01  
 STD. DEV. Y .210766<sub>10</sub>-00

KONSTANTA .801484<sub>10</sub>+02

SPREM.	KOEFICIENT	STD. NAP.	KOEF.
12'	-.729046 <sub>10</sub> -00	.970177 <sub>10</sub> -01	
14'	-.816299 <sub>10</sub> -00	.595088 <sub>10</sub> -01	
15'	-.359982 <sub>10</sub> +01	.804569 <sub>10</sub> -00	
16'	-.479317 <sub>10</sub> -00	.176763 <sub>10</sub> -00	
31'	-.216541 <sub>10</sub> -01	.129129 <sub>10</sub> -02	
33'	.196071 <sub>10</sub> -00	.573+43 <sub>10</sub> -01	

KOEF. DET. .955560<sub>10</sub>-00  
 KOEF. KOREL. .977527<sub>10</sub>-00

Imamo kar 6 korakov.

Končna regresijska enačba zajame vpliv petih neodvisnih spremenljivk.

$$X_{17}' = 80,15 - 0,729 X_{12} - 0,02165 X_{13}^2 - 0,8163 X_{14} + 0,197 X_{15}^2 - 3,6 X_{15} - 0,4793 X_{16} \quad (11)$$

Nomogram za to zvezo vidimo na sliki 6. Vidimo močan vpliv sprejemljivke  $X_{14}$ . Koeficient determinacije je zelo velik 0,96, ker je res skoraj vsa variacija spremenljivke  $X_{17}'$  pojasnjena z regresijsko enačbo (11). Takih rezultatov si v praksi seveda zelo želimo, a žal niso zelo pogosti.

Oglejmo si še primer rezultatov, ko spremenljivka izstopa iz regresijske enačbe. To vidimo na sliki 7. Rezultati nimajo več zveze s prejšnjimi podatki, ker pripadajo čisto drugemu primeru. Sedaj

nas zanima odvisnost spremenljivke  $X_8$  od 32 neodvisnih spremenljivk  $X_1, X_2, \dots, X_{32}$ . Iščemo torej  $X_8 = f(X_1, X_2, \dots, X_{32})$ .

Na sliki 7 vidimo, da vstopajo po vrsti spremenljivke  $X_{11}, X_{29}, X_4, X_{31}$ , nato izstopi spremenljivka  $X_{11}$ , ker so njen vpliv na odvisno spremenljivko pojasnile ostale spremenljivke, ki so za njo vstopile v regresijsko enačbo. Na koncu vstopi še spremenljivka  $X_{27}$ . V 5. koraku vidimo ob izstopu spremenljivke  $X_{11}$ , da je izračunani  $F = 3,7$  — to je manj od vrednosti 4, ki smo jo vzeli v podatkih za  $F_2$ . Standardna deviacija odvisne spremenljivke se je v 5. koraku povečala za 0,02, koeficient determinacije pa se je zmanjšal za 0,016. Te spremembe so v našem primeru nepomembne, zato je spremenljivka  $X_{11}$  izstopila iz regresijske enačbe.

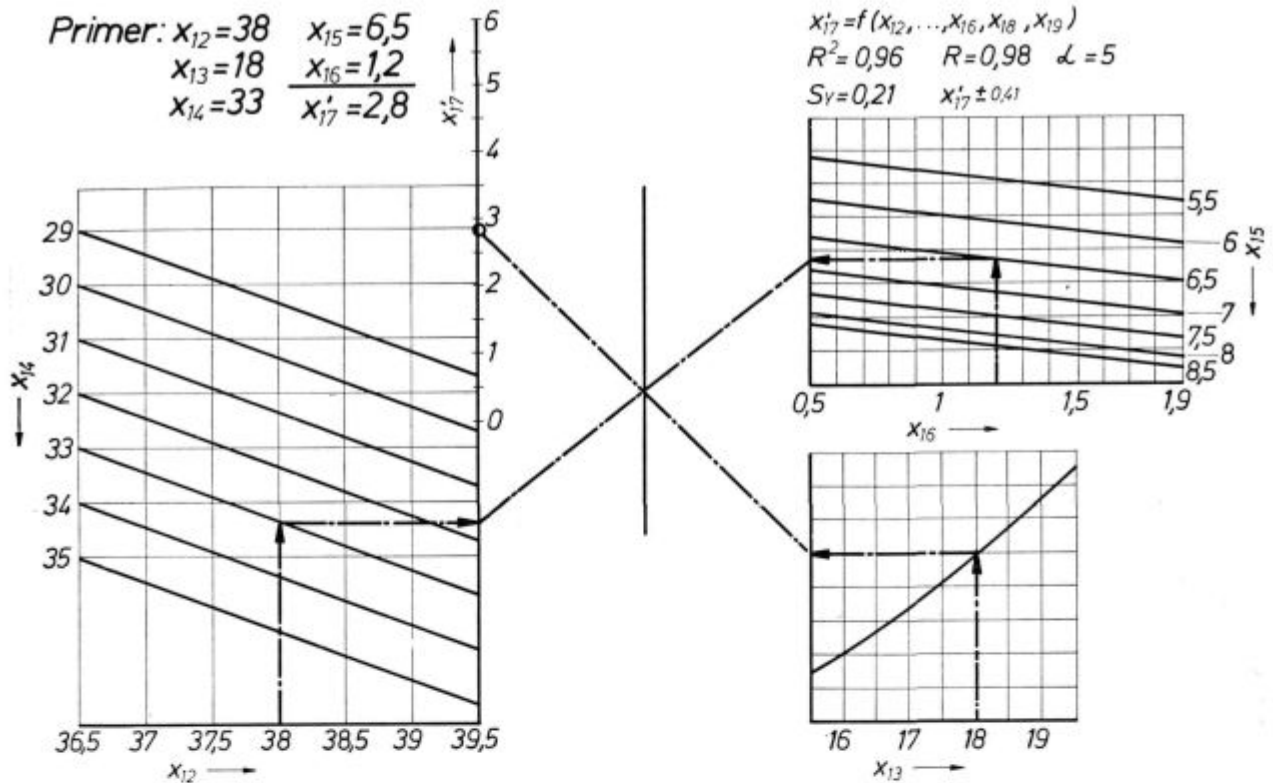
Vidimo tudi, da po izstopu spremenljivke spet lahko vstopi kakšna spremenljivka. Standardna deviacija odvisne spremenljivke se spet zmanjša in koeficient korelacije se spet poveča.

Tabela.  $F_{\alpha, r, \nu}$

$\nu$	$\alpha = 10$	$\alpha = 5$	$\alpha = 1$	$\alpha = 0,1$
1'	29,86	161,4	4052	4,053+05
2'	8,53	18,51	98,5	998,5
3'	5,54	10,13	34,12	167,3
4'	4,55	7,71	21,20	74,14
5'	4,06	6,61	16,24	47,18
6'	3,78	5,99	13,74	35,51
7'	3,59	5,59	12,25	29,25
8'	3,46	5,32	11,26	25,39
9'	3,36	5,12	10,57	22,95
10'	3,29	4,97	10,05	21,04
11'	3,23	4,85	9,66	19,60
12'	3,18	4,75	9,33	18,64
13'	3,14	4,67	9,08	17,82
14'	3,10	4,60	8,87	17,15
15'	3,07	4,55	8,69	16,59
16'	3,05	4,50	8,53	16,12
17'	3,03	4,45	8,40	15,72
18'	3,01	4,42	8,29	15,38
19'	2,99	4,38	8,19	15,08
20'	2,98	4,35	8,10	14,82
21'	2,96	4,33	8,02	14,59
22'	2,95	4,30	7,95	14,38
23'	2,94	4,28	7,88	14,20
24'	2,93	4,26	7,83	14,03
25'	2,92	4,24	7,77	13,88
26'	2,91	4,23	7,72	13,74
27'	2,90	4,21	7,68	13,62
28'	2,90	4,20	7,64	13,50
29'	2,89	4,19	7,60	13,39
30'	2,88	4,17	7,57	13,30
40'	2,84	4,09	7,32	12,61
60'	2,79	4,00	7,05	11,97
120'	2,75	3,92	6,85	11,39
$\infty$	2,71	3,84	6,63	10,83

### Program »Koeficienti parcialne korelacije«

Dotatno k programu analize regresije smo pri raziskavah jekel razvili še poseben program z naslovom: »Koeficienti parcialne korelacije«. Razlog za razvoj tega programa je bil v tem, da se pri nekaterih raziskavah nismo več zadovoljili samo s končno ugotovitvijo regresijske enačbe, ampak



Slika 6

Primer monograma za pet pomembnih spremenljivk

smo želeli ugotoviti še medsebojno povezanost spremenljivk. Začetni del tega programa nam sedaj uspešno služi tudi za orientacijsko testiranje medsebojnih odvisnosti, ki nam s preglednim prikazom vseh linearnih medsebojnih zvez lahko precej pripomore k učinkovitejšemu in vsebinsko boljšemu planiranju podrobnejše analize regresije.

Oglejmo si uporabo tega programa na tehnično zelo zanimivem primeru s področja raziskav lastnosti brzoreznih jekel. Tako bo vrednost in praktična uporabnost tega programa predvsem metalurgom mnogo bolj razumljiva.

V obširnem programu raziskav lastnosti brzoreznih jekel smo posebej ugotavljali vpliv velikosti karbidov na mehanske in tehnološke lastnosti tega jekla. Za uvodne raziskave in ugotavljanje medsebojnih odvisnosti kvalitetnih karakteristik v žarjenem, kaljenem in popuščnem stanju smo imeli na voljo za poizkuse 153 palic iz ene in iste šarže z različnimi velikostmi karbidov.

Za vsakega od 153 vzorcev smo določili:

- trdoto ( $x_1$ ) in velikost karbidov ( $x_2$ ) v žarjenem stanju,
- oceno preloma ( $x_3$ ), trdoto ( $x_4$ ), velikost karbidov ( $x_5$ ) in velikost avstenitnega zrna ( $x_6$ ) v kaljenem stanju,
- trdoto ( $x_7$ ) in popuščno obstojnost ( $x_8$ ) v popuščnem stanju.

Ker so nas zanimala skoraj vse medsebojne odvisnosti omenjenih spremenljivk, smo morali izvršiti veliko število analiz regresije. Nekaj naj-

pomembnejših ali najbolj značilnih smo prikazali v članku o brzoreznih jeklih<sup>9</sup>. Tak način je zamuden, zaključki s prikazom ugotovljenih odvisnosti pa so zelo nepregledni. Rešitev smo našli z razvojem omenjenega programa, ki nam v svojem prvem delu poda medsebojno povezanost vseh osmih spremenljivk in to vsake z vsako s tabelarično zbranimi koeficienti korelacije v obliki pregledne matrice. To lahko tudi grafično še bolj pregledno prikazemo.

Na sliki 8 je izpis računalnika po tem programu. Pod naslovom »OBICAJNI KOREL. KOEF.« je matrica koeficientov, ki nam pove, kakšna je zveza med dvema spremenljivkama ob predpostavki, da so druge spremenljivke pri tem nespremenljive. V tej matrici so v prvi vrsti koeficienti vseh spremenljivk z  $x_1$ , v drugi vrsti koeficienti vseh spremenljivk z  $x_2, \dots$ , v zadnji vrsti pa koeficienti vseh spremenljivk z  $x_8$ . Matrica je seveda simetrična, saj je koeficient med  $x_2$  in  $x_3$  isti kakor med  $x_3$  in  $x_2$ . Predznak minus pri teh koeficientih pomeni obratno sorazmernost, če pa pred koeficientom ni predznaka, pomeni to premosorazmernost spremenljivk.

Poljubno si lahko v poenostavljeni matrici z okroženimi vrednostmi koeficientov označimo pomembnost medsebojnih odvisnosti z jakostnimi rangi, kakor kaže slika 9. Še bolj praktično uporaben in pregleden je grafični prikaz s krogom, v katerem povezave posameznih spremenljivk prikazujejo pomembnost medsebojne povezanosti in premo ali obratno sorazmernost.

Protokol rezultatov analize regresije za primer,  
ko spremenljivka izstopa iz enačbe regresije

## KONTROLNE VSOTE

.42559999 <sub>9</sub> +02	.88199999 <sub>9</sub> +01	.47519999 <sub>9</sub> +02
.37650000 <sub>0</sub> +02	.50400000 <sub>0</sub> +01	.12309999 <sub>9</sub> +02
.31180000 <sub>0</sub> +05	.22021999 <sub>9</sub> +04	

F1= .400000<sub>0</sub>+01F2= .400000<sub>0</sub>+01STD. DEV. Y .126250<sub>0</sub>+01

1'

VSTOPA X 11'

IZRACUNANI F .792023<sub>0</sub>+02STD. DEV. Y .715490<sub>0</sub>-00KONSTANTA .589776<sub>0</sub>+02

SPREM. KOEFICIENT STD. NAP. KOEF.

11' -.487547<sub>0</sub>-00.547832<sub>0</sub>-01

KOEf. DET. KOEF. KOREL.

.607506<sub>0</sub>-00 .829160<sub>0</sub>-00

2'

VSTOPA X 29'

IZRACUNANI F .624830<sub>0</sub>+01STD. DEV. Y .660423<sub>0</sub>-00KONSTANTA .593256<sub>0</sub>+02

SPREM. KOEFICIENT STD. NAP. KOEF.

11' -.499104<sub>0</sub>-00.513879<sub>0</sub>-0129' -.390413<sub>0</sub>+03.156186<sub>0</sub>+03

KOEf. DET. KOEF. KOREL.

.734842<sub>0</sub>-00 .857229<sub>0</sub>-00

3'

VSTOPA X 4'

IZRACUNANI F .191112<sub>0</sub>+02STD. DEV. Y .542616<sub>0</sub>-00KONSTANTA .533855<sub>0</sub>+02

SPREM. KOEFICIENT STD. NAP. KOEF.

4' .401806<sub>0</sub>+01.919119<sub>0</sub>-0011' .629746<sub>0</sub>-00.261569<sub>0</sub>-0029' -.890041<sub>0</sub>+03.170697<sub>0</sub>+03

KOEf. DET. KOEF. KOREL.

.830255<sub>0</sub>-00.911183<sub>0</sub>-00

4'

VSTOPA X 31'

IZRACUNANI F .602599<sub>0</sub>+01STD. DEV. Y .506471<sub>0</sub>-00KONSTANTA .531332<sub>0</sub>+02

SPREM. KOEFICIENT STD. NAP. KOEF.

4' .323013<sub>0</sub>+01.915975<sub>0</sub>-0011' .445347<sub>0</sub>-00.251131<sub>0</sub>-0029' -.882500<sub>0</sub>+03.159356<sub>0</sub>+0331' .200914<sub>0</sub>-11.117694<sub>0</sub>-11

KOEf. DET. KOEF. KOREL.

.856465<sub>0</sub>-00.925454<sub>0</sub>-00

5'

IZSTOPA X 11'

IZRACUNANI F .373509<sub>0</sub>+01STD. DEV. Y .526448<sub>0</sub>-00KONSTANTA .554663<sub>0</sub>+02

SPREM. KOEFICIENT STD. NAP. KOEF.

4' .149358<sub>0</sub>+01.184894<sub>0</sub>-0029' -.686436<sub>0</sub>+03.127739<sub>0</sub>+0331' .342193<sub>0</sub>-11.118933<sub>0</sub>-11

KOEf. DET. KOEF. KOREL.

.840219<sub>0</sub>-00.916635<sub>0</sub>-00



6°  
 VSTOPA X 21°  
 IZRACUNANI F .482964, +01  
 STD. DEV. Y .499093, -02

KONSTANTA .543326, +02

SPREM. KOEFICIENT STD. NAP. KOEF.  
 4° .255194, +01 .512496, -00  
 21° .518102, -01 .235753, -01  
 29° -.905040, +03 .156717, +03  
 31° .299778, -11 .114392, -11

KOEF. DET. KOEF. KOREL.  
 .860618, -00 .927695, -00

Oglejmo si le del strokovno tehničnega komentarka k sliki 9:

Iz razpoložljivih podatkov smo lahko ugotovili in kvantitativno potrdili strokovno razumljivo domnevo, da je med velikostjo karbidov v žarjenem in kaljenem stanju, zrnatostjo preloma po Shepherdovi metodi in metalografsko oceno velikosti avstenitnega zrna po metodi Snyder-Graffa zelo ozka medsebojna zveza (koeficienti korelacije so vsi večji od 0,8 — sl. 9).

Regresijska odvisnost  $x_3 = f(x_2)$  je podana z visokim koeficientom korelacije  $R = 0,911$ . Koeficient determinacije  $R^2 = 0,83$  v nekoliko poenostavljeni obliki pomeni, da je 83 % variacij spremenljivke  $x_3$  (velikost karbidov v kaljenem stanju) pojasnjenih z variacijami spremenljivke  $x_2$  (velikost karbidov v žarjenem stanju), preostalih 17 % variacij pa ostaja ob tej regresiji še nepojasnjenih ali praktično odvisnih od drugih vplivov.

Ker je poznano, da so grobi karbidi v kaljenem brzoreznem jeklu lahko posledica različnih vplivov (npr. pregretje jekla pri kaljenju), je omenjena ugotovitev potrjena kvantitativno s koeficientom zelo pomembna in nam omogoča neposredno tehnološki zaključek z identifikacijo nastanka grobih karbidov. V našem primeru lahko z gotovostjo trdimo, da karbidi, ki smo jih opazili v kaljenem stanju niso nastali med kaljenjem, ampak so bili v mikrostrukturi jekla v skoraj enaki obliki prisotni že prej — v žarjenem stanju. Za nastanek takih karbidov med žarjenjem ni potrebnih pogojev, zato na osnovi take regresije lahko z gotovostjo trdimo, da so grobi karbidi v našem primeru nastali pred in med vročo predelavo jekla.

Na tak način lahko komentiramo še ostale medsebojne odvisnosti in lahko se odločimo, katere odvisnosti bomo smatrali v primerjavi z drugi-

mi za nepomembne: Takih sploh ne prikazujemo! Tak prikaz pa nam lahko pomaga tudi kot pomoč pri začetni selekciji oziroma pri odločitvi, katere odvisnosti in katere kombinacije so res zanimive za podroben izračun enačbe analize regresije in za prikaz z monogramom. Lahko si prihranimo mnogo podrobnih izračunov nepomembnih in neinteresantnih regresij.

Izračun matrice običajnih koeficientov korelacije lahko torej smatramo za zelo priporočljiv uvodni korak pri analizah množične regresije.

Poglejmo na istem primeru še pomen koeficientov parcialne korelacije. Ti koeficienti, zbrani v podobni matrici, nam povedo, kakšna je zveza med dvema spremenljivkama ne glede na to, kakšne vrednosti imajo pri tem ostale spremenljivke. V računskem postopku se namreč spreminjanje ostalih spremenljivk izloči tako, da se vzame za parcialni koeficient korelacije med dvema spremenljivkama povprečje običajnih koeficientov korelacije pri različnih konstantnih vrednostih ostalih spremenljivk. Vrstni red v matrici teh koeficientov je zopet isti, le predznaki koeficientov imajo drugačen pomen. Pri parcialnih koeficientih pomeni predznak minus premo sorazmernost, medtem ko pri običajnih pomeni obratno sorazmernost.

Če označimo koeficient parcialne korelacije med  $x_i$  in  $x_j$  s  $p_{ij}$ , potem ima matrica vseh koeficientov obliko:

$P_{11}$	$P_{12} \dots \dots P_{18}$
$P_{21}$	$P_{22} \dots \dots P_{28}$
.	.
.	.
.	.
$P_{81}$	$P_{82} \dots \dots P_{88}$

kjer so  $p_{ii} = 1$ ;  $i = 1, 2 \dots 8$   
 $p_{ij} = p_{ji}$ ;  $i, j = 1, 2 \dots 8$  in  
 $|p_{ij}| \leq 1$

Za primer vzemimo koeficient parcialne korelacije med spremenljivkama  $x_4$  in  $x_7$ , to je  $p_{47} = -0,9957$ . To je vrednost zelo blizu 1. Zato sklepamo, da sta spremenljivki  $x_4$  in  $x_7$  tesno povezani med seboj. Tudi za parcialne koeficiente si za lepši pregled narišemo enako sliko 10 in na črte, ki povezujejo spremenljivke, lahko napišemo vrednosti koeficientov. Tiste z višjimi vrednostmi koeficientov narišemo debelejše.

Med rezultati na protokolu slike 8 so tudi koeficienti regresijske enačbe, če vzamemo za odvisno spremenljivko  $x_8$  in za neodvisne  $x_1, x_2 \dots x_7$ . Pri programu »Koeficienti parcialne korelacije« računalnik vedno izračuna koeficiente za vse neodvisne spremenljivke, potem pa določi pomembnost regresijske enačbe z F testom. Zato izpiše prostostni stopnji  $N_1$  in  $N_2$  ter vrednost F (glej sliko 8).

Protokol rezultatov analize regresije po programu, ki izračuna običajne in parcialne koeficiente korelacije

## KONTROLNE VSOTE

.40696000<sub>10</sub>+05 .105100000<sub>10</sub>+04 .130125300<sub>10</sub>+04 .975964999<sub>10</sub>+04 .106500000<sub>10</sub>+04  
 .182600000<sub>10</sub>+04 .987269993<sub>10</sub>+04 .114510000<sub>10</sub>+03

## OBICAJNI KOREL. KOEF.

.1000 <sub>10</sub> +01	-.7212 <sub>10</sub> -01	-.1016 <sub>10</sub> -00	-.2424 <sub>10</sub> -01	-.4310 <sub>10</sub> -01	-.8476 <sub>10</sub> -01	.1276 <sub>10</sub> -00	.1641 <sub>10</sub> -00
-.7212 <sub>10</sub> -01	.1000 <sub>10</sub> +01	.9151 <sub>10</sub> -00	.6564 <sub>10</sub> -00	.9111 <sub>10</sub> -00	.8415 <sub>10</sub> -00	.4062 <sub>10</sub> -00	-.1700 <sub>10</sub> -00
-.1016 <sub>10</sub> -00	.9151 <sub>10</sub> -00	.1000 <sub>10</sub> +01	.6638 <sub>10</sub> -00	.4320 <sub>10</sub> -00	.9201 <sub>10</sub> -00	.3788 <sub>10</sub> -00	-.2092 <sub>10</sub> -00
-.2424 <sub>10</sub> -01	.6569 <sub>10</sub> -00	.6638 <sub>10</sub> -00	.1000 <sub>10</sub> +01	.6127 <sub>10</sub> -00	.6582 <sub>10</sub> -00	.3947 <sub>10</sub> -00	-.4775 <sub>10</sub> -00
-.4310 <sub>10</sub> -01	.9111 <sub>10</sub> -00	.9320 <sub>10</sub> -00	.6127 <sub>10</sub> -00	.1000 <sub>10</sub> +01	.8723 <sub>10</sub> -00	.3707 <sub>10</sub> -00	-.1725 <sub>10</sub> -00
-.8476 <sub>10</sub> -01	.8415 <sub>10</sub> -00	.9201 <sub>10</sub> -00	.6582 <sub>10</sub> -00	.8723 <sub>10</sub> -00	.1000 <sub>10</sub> +01	.4078 <sub>10</sub> -00	-.1767 <sub>10</sub> -00
.1276 <sub>10</sub> -00	.4062 <sub>10</sub> -00	.3788 <sub>10</sub> -00	.3947 <sub>10</sub> -00	.3707 <sub>10</sub> -00	.4078 <sub>10</sub> -00	.1000 <sub>10</sub> +01	.6172 <sub>10</sub> -00
.1641 <sub>10</sub> -00	-.1700 <sub>10</sub> -00	-.2092 <sub>10</sub> -00	-.4775 <sub>10</sub> -00	-.1725 <sub>10</sub> -00	-.1767 <sub>10</sub> -00	.6172 <sub>10</sub> -00	.1000 <sub>10</sub> +01

KONSTANTA -.3516<sub>10</sub>-00

SPREM.	KOEFICIENT	STD. NAP. KOEF.	T
1 <sup>o</sup>	.5151 <sub>10</sub> -03	.9828 <sub>10</sub> -04	.5241 <sub>10</sub> +01
2 <sup>o</sup>	-.4501 <sub>10</sub> -02	.4540 <sub>10</sub> -02	.9914 <sub>10</sub> -00
3 <sup>o</sup>	.5217 <sub>10</sub> -02	.7918 <sub>10</sub> -02	.6580 <sub>10</sub> -00
4 <sup>o</sup>	-.9922 <sub>10</sub> -00	.6622 <sub>10</sub> -02	.1498 <sub>10</sub> +03
5 <sup>o</sup>	.2505 <sub>10</sub> -03	.4770 <sub>10</sub> -02	.5251 <sub>10</sub> -01
6 <sup>o</sup>	-.7070 <sub>10</sub> -03	.1877 <sub>10</sub> -02	.4191 <sub>10</sub> -00
7 <sup>o</sup>	.9957 <sub>10</sub> -00	.4828 <sub>10</sub> -02	.2062 <sub>10</sub> +03

N1	N2	F
7 <sup>o</sup>	.1450 <sub>10</sub> +03	.8721 <sub>10</sub> +04

KOEFICIENTI	PARCIALNE	KORELACIJE
.1000 <sub>10</sub> +01	.4333 <sub>10</sub> -02	.1300 <sub>10</sub> -00
.4033 <sub>10</sub> -02	.1000 <sub>10</sub> +01	-.3649 <sub>10</sub> -00
.1300 <sub>10</sub> -00	-.3649 <sub>10</sub> -00	.1000 <sub>10</sub> +01
-.4033 <sub>10</sub> -02	.6775 <sub>10</sub> -01	-.6265 <sub>10</sub> -01
-.1292 <sub>10</sub> -00	-.4116 <sub>10</sub> -00	-.4263 <sub>10</sub> -00
.1217 <sub>10</sub> -01	.1023 <sub>10</sub> -00	-.5475 <sub>10</sub> -00
.3092 <sub>10</sub> -00	-.8967 <sub>10</sub> -01	.5871 <sub>10</sub> -01
-.3991 <sub>10</sub> -00	.8205 <sub>10</sub> -01	-.5463 <sub>10</sub> -01

TOTALNA VARIANCA	NEPOJASNJENA VARIANCA
4105 <sub>10</sub> +02	.9727 <sub>10</sub> -01

KOEF. MULT. KOREL.	DET. KOEF.
.9988 <sub>10</sub> -00	.9976 <sub>10</sub> -00

**Žarjeno stanje**

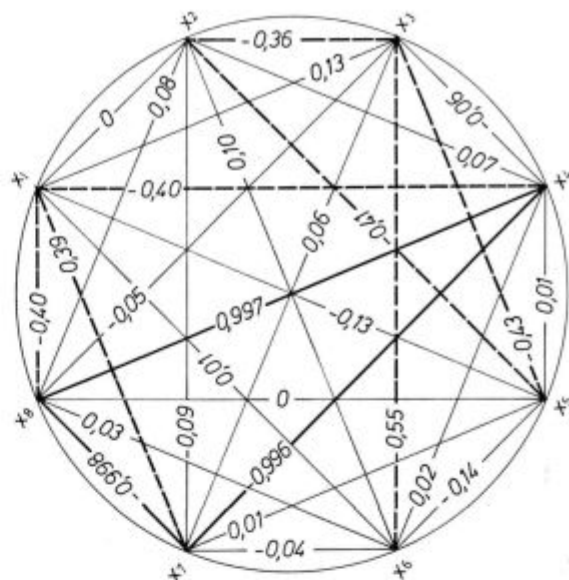
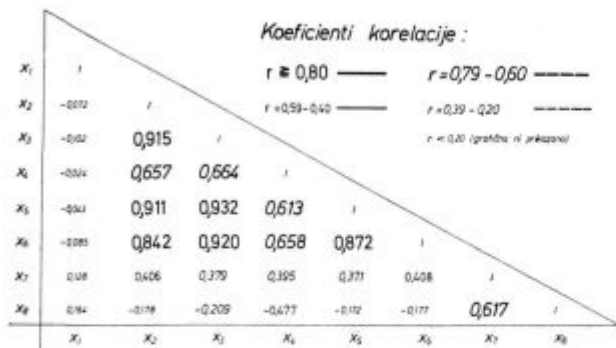
- $x_1$  - trdota HB
- $x_2$  - index velikosti karbidov  $l_v$

**Kaljeno stanje**

- $x_3$  - ocena preloma F po Sheperdu
- $x_4$  - trdota HRC
- $x_5$  - index velikosti karbidov  $l_v$
- $x_6$  - velikost austenitnega zrna SG po Snyder-Graflu

**Popuščeno stanje**

- $x_7$  - trdota HRC
- $x_8$  - popuščna obstojnost  $D_{vec}$   
 $D_{vec} = HRC_{popuščeno} - HRC_{kaljeno}$



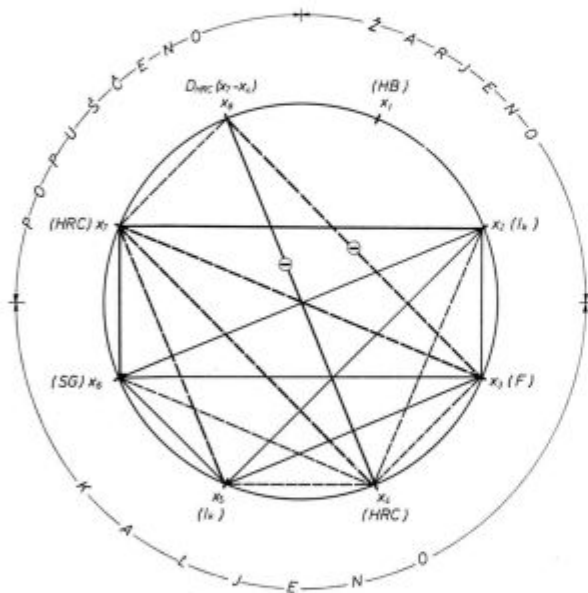
Slika 10

**Koeficienti parcialne korelacije med spremenljivkami**  
 $x_1 \dots \dots \dots x_8$

Za koeficienti parcialne korelacije dobimo tudi vrednosti totalne in nepojasnjene variance, nato pa koeficient množične korelacije in koeficient determinacije.

**Literatura**

1. Rodič J.: »Metode matematične statistike«, Zelezarski zbornik, 1967, I., št. 2., str. 137—154
2. Rodič J.: »Sistemi kontrole in metodika reševanja tehnoloških problemov«, Zelezarski zbornik, 1968, II., št. 3., str. 153—163
3. Rode B.: »Analiza statistične porazdelitve na elektronskem računalniku«, Zelezarski zbornik, 1967., I., št. 3, str. 189—203/
4. Rode B., J. Rodič: »Statistično planiranje in vrednotenje metalurških raziskav — Analize variance s programi na računalniku ZUSE Z-23«, Zelezarski zbornik, 1968, II., št. 2., str. 99—111
5. Rode B.: »Statistično planiranje in vrednotenje metalurških raziskav — Latinski kvadrat s programom na elektronskem računalniku«, Zelezarski zbornik, 1969, III., št. 2, str.
6. Zanella A.: Programi di calcolo automatico nel controllo della qualità e nella programmazione degli esperimenti, AICQM, maj 1962, str. 11—26
7. Miller S. A., R. J. Taylor: Pegasus Program Multiple Regression Analysis, BISRA, List 143, Oktober November 1965
8. Ralston A., H. S. Wilf: Mathematical Methods for Digital Computers, John Wiley and Sons, str. 191—203.
9. Rodič J., A. Rodič: Brzorezna jekla III. del, Zelezarski zbornik, 1968, II. št. 3, str. 167—170



Slika 9

**Običajni koeficienti korelacije**

V našem primeru je  $F = 8721$ . To je velika vrednost in regresijska enačba je gotovo 99,99 % pomembna.

**ZUSAMMENFASSUNG**

Im Artikel sind zwei Programme aus dem Bereich der Regressanalyse beschrieben. Der erste Programm ist nach der »Schrittweise« Methode ausgefertigt und bestimmt

nur die wichtigsten Variablen, welche eine hinter der anderen in die Regressionsgleichung eintreten.

Der Programm ist an den Beispielen aus der Elektrorechenmaschine Z-23 gedeutet.

Es sind auch die Nomogramme dieser Beispiele gezeigt, an welchen die Resultate graphisch dargestellt sind. Solche Nomogramme haben sich bei der Forschungsarbeit im Hüttenwerk Ravne schon eingebürgert.

Der zweite Programm rechnet die üblichen und die partialen Koeffiziente der Korrelation.

Auch dieser Programm ist an einem praktischen Beispiel aus dem Hüttenwerk Ravne gedeutet.

## SUMMARY

In the paper two computer programs are described from the field of regression analysis. The first program is made by the stepwise procedure and it determines only the basic variables which one after the other enter the regression equation.

The program is illustrated with examples of results obtained from computer ZUSE Z-23.

Also nomograms of these examples are given which

graphically interpret the results. Such nomograms are very much used in the research work at the Iron and Steel Works Ravne.

The second program calculates simple and partial correlation coefficients.

Also this program is illustrated with a practical example from Iron and Steel Works Ravne.

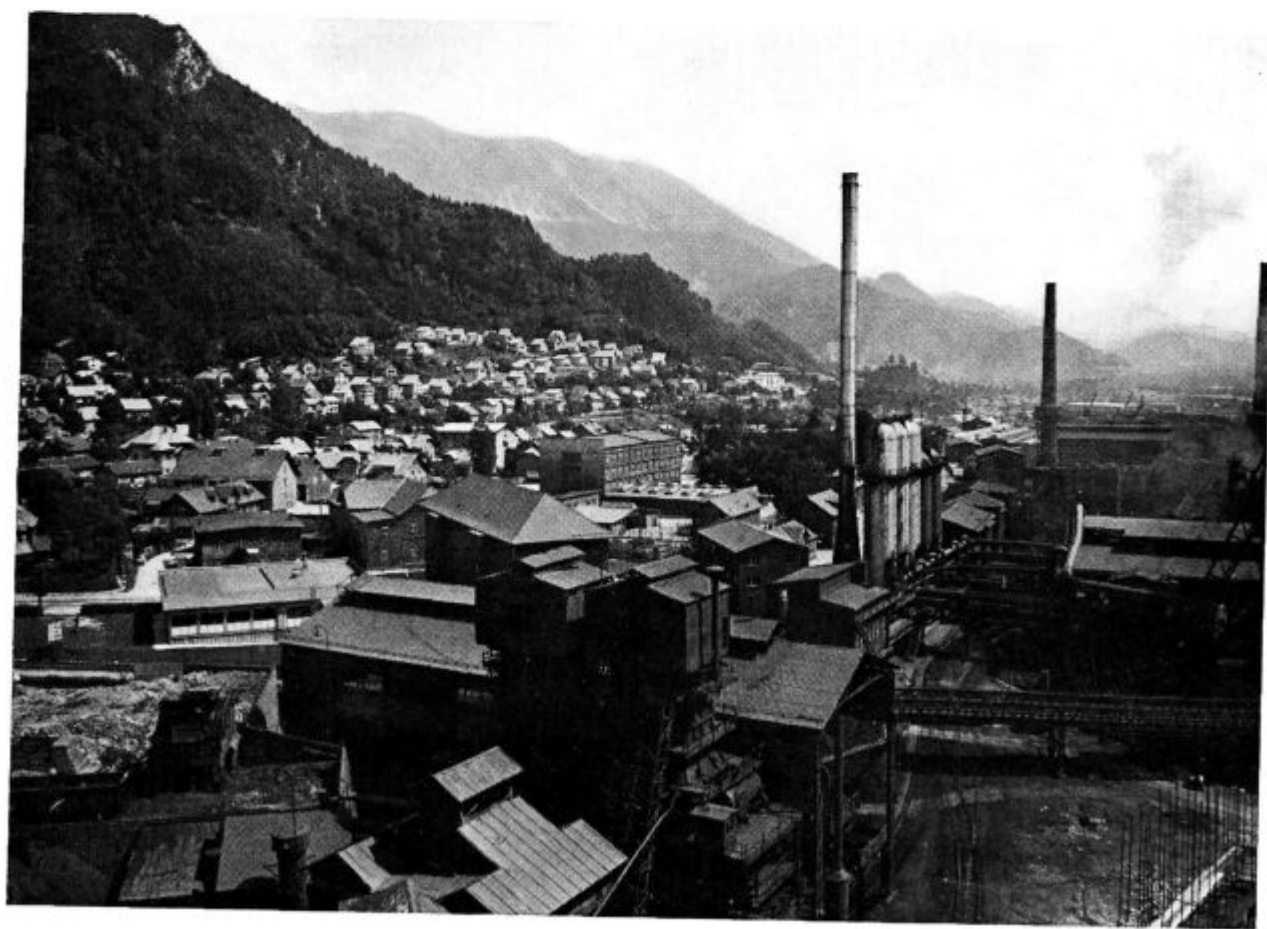
## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье описаны два программы из отрасли анализа регрессии. Первая программа сделана методом «Шаг за шагом»; она определяет только важные переменные данные которые один за другим вступают в регрессионное уравнение. Программа объяснена на целом ряде результатов полученных при помощи электронного счётчика типа Zuse Z-23.

Приведены также номограммы тех примеров которые дают результаты в форме графика. Такие номограммы уже вошли в общее употребление при работах исследования металлургического завода Равне. Другая программа вычисляет обыкновенные и парциальные коэффициенты взаимного соответствия.

Также и эта программа объяснена при помощи практического примера металлургического завода Равне.





Del obratov železarne Jesenice — Foto Makovec

## Določevanje silicijeve kisline z želatino v proti ognju odporni keramiki in glinah

*Določevanje silicijeve kisline z želatino je pri nas zapostavljen analitski postopek. Opozoriti hočemo nanj v zvezi s termometrično analizo žlinder, ki jo pravkar proučujemo in o kateri bomo kmalu tudi spregovorili. Da ne bi takrat izgubljali časa in prostora, hočemo navesti že sedaj nekaj naših izkustev o uporabnosti tega odličnega obarjalnega reagenta.*

### UVOD

#### Pregled literature

Že relativno zgodaj je ugotovil K. L. Weiss<sup>1</sup>, da se da izločiti silicijeva kislina z želatino iz klorovodikovo kisle raztopine in da se dobro filtrira. Tudi N. A. Tananaev in M. K. Buičkov<sup>2</sup> sta obarjala silicijevo kislino z želatino. Vendar se ta postopek ni mogel razširiti v analitiki vse do druge svetovne vojne. Na široko so obravnavali nemški kemiki uporabnost metode za določevanje silicija v jeklu in grodlju na zborovanju kemikov metalurške stroke, na katerem je K. L. Weiss<sup>3</sup> podrobno poročal o njej. Mnenja strokovnjakov so se delila. Na splošno so si bili strokovnjaki edini, da je metoda uporabna, kadar gre za relativno nizke vsebine silicija, medtem ko odpove pri visokih vsebinah, kot npr. pri ferosiliciju. Ugotovljene vrednosti silicija so do 3 % nižje od dejanskih. Poleg tega navaja avtor, da se da metoda uporabiti tudi za rude in žlindre. Ni pa bilo govora o proti ognju odpornih materialih.

E. Hammarberg<sup>4</sup> obravnava isto problematiko, vendar ima bolj pisano izbiro analiziranih vzorcev. Avtor trdi, da je metoda zanesljiva.

Vsekakor se je zanesljivost metode toliko uveljavila, da je sprejeta v Nemčiji v izbor analiznih postopkov<sup>5</sup>. Namesto želatine lahko uporabljamo tudi klej ali vizji klej (Hausenblase).

Pri starih načinih določevanja silicijeve kisline v navzočnosti bora<sup>6</sup> je nevarno, da preide pri dehidratizaciji silicijeve kisline tudi bor v netopne spojine. V takšnih primerih dobimo v oborini bor skupaj s silicijevo kislino. Pri odkajevanju silicijeve kisline izženemo tudi bor. Rezultati so previsoki.

Avtor navaja novo metodo, ki združuje želatinsko<sup>7</sup> in glicerolno<sup>8</sup> metodo. Prednost te metode je, da glicerol zadržuje bor v raztopini, ko dehidratizira silicijevo kislino pri več kot 150° C. Šele nato obarja silicijevo kislino z želatino.

Rezultati se zelo dobro ujemajo z vrednostmi standardnih normalk.

#### Predhodne raziskave

Iz literaturnih virov povzamemo, da so avtorji preiskovali snovi, ki se v kislinah tope. Manj raziskano je področje glin in keramike. Zato smo morali predhodno rešiti nekaj neznank.

Vzorci smo morali spraviti v topno obliko. Izbrali smo talila z nizkim tališčem. Mešanice natrijevega hidroksida in peroksida ni priporočljiva, ker v začetku precej brizga, sicer je pa ta mešanica odlično talilo za keramiko. Vzeli smo mešanico kalijevega-natrijevega karbonata in natrijevega peroksida. V 10 minutah je bil vzorec razkrojen pri temperaturi rdečega žara, razen dveh primerkov, ki smo ju morali taliti vsaj 15 minut. Boratnih talil nismo uporabili iz znanih razlogov.

Preskusili smo nikljev in debelostenski srebrov lonček. Oba sta odlično prestala preizkušnjo v temno rdečem žaru. V srebrovem lončku smo opravili prek 60 talin in je bil še vedno uporaben. Le alkalno talino iz srebrovega lončka smo raje filtrirali in vzeli alikvot iz večje zatehte, da ni bilo treba odpravljati srebrovega iona iz kisle raztopine. Sedanje skušnje so pokazale, da lahko uspešno talimo snovi z natrijevim ali kalijevim hidroksidom v srebri skodeli, ne da bi se srebro oksidiralo.

Pri izparevanju razredčene kisle raztopine mora paziti, da se stene čaše ne pregrejejo preveč, ker se sicer silicijeva kislina prilepi. Priporočljivo je, da vzamemo nove oziroma površinsko nenagrizene čaše, in da dovajamo toploto predvsem na dno čaše.

Ugotoviti smo morali najugodnejšo koncentracijo klorovodikove kisline. Prav zagotovo je koncentracija klorovodikove kisline bistven pogoj, če hočemo silicijevo kislino kvantitativno oboriti z želatino. Predhodni poskusi so pokazali kako odločilno vpliva koncentracija kisline na kvantitativno izločenje silicijeve kisline z želatino. Ugotovili smo, da mora biti koncentracija klorovodikove kisline vsaj 6 molarna, več ne škodi, manj pa občutno zmanjša rezultate. Koncentracija kloridov ne more nadomestiti koncentracije vodikovih ionov, čeprav govori literatura v prid kloridom. Bistveno je, da se koloidni sol silicijeve kisline depolarizira. Oborino moramo previdno sežigati mo-

kro, da lepo sprhni. Če sežigamo posušeno oborino, želatina tako zogleni, da ogljika ne sežgemo več, kar pokvari rezultat.

### Analizni postopek z želatino

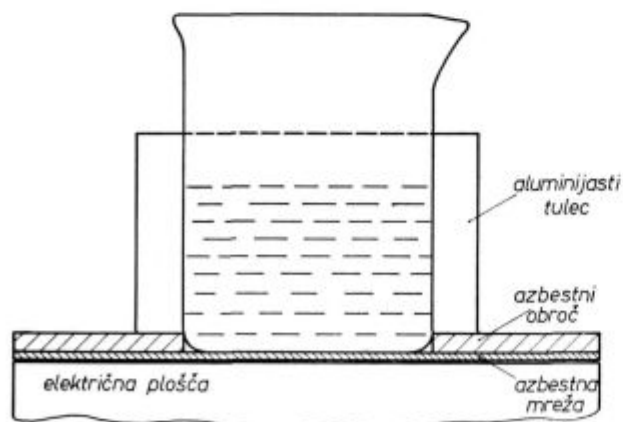
V nikljast lonček natresemo okoli 2 g kalijevega-natrijevega karbonata, nanj nasujemo okoli 4 g natrijevega peroksida. Na to podlago stresemo stehano količino drobno zmletga in posušenega vzorca. V našem primeru jemljemo po 0,5 g zatehte. Vzorec in talilo enakomerno premešamo s platinsko žico ali s tanko stekleno paličico. Zmes enakomerno posujemo s približno 1 g kalijivega-natrijevega karbonata, lonček pa pokrijemo.

Zmes počasi stalimo nad gorilnikom ali pa v primerno temperirani jaškasti pečici. Ko talina steče, jo pustimo nekaj minut pri miru, da snovi med sabo zreagirajo. Seveda je dobro, da pozneje talino večkrat premešamo. Ves čas taljenja skrbimo, da temperatura ni previsoka. Temno rdeča talina popolnoma zadostuje. Boljše je za lonček, da dalj časa talimo, kot pa da ga po nepotrebnem pregrejemo.

Po desetih minutah je vzorec navadno raztaljen. Vsebino ohladimo. Hladen lonček postavimo v 250 ml široko čašo. Pod urnim steklom nalijemo vroče vode v lonček. Morda to večkrat ponovimo. Ko reakcija poneha, izplaknemo lonček z vodo. Morebitnemu ostanku v lončku prilijemo vroče vode, pokrijemo lonček in ga postavimo na kuhalnik, da vsebina zavre in se pomiri. Z gumico zdrgnemo stene in vsebino zlijemo k prejšnji.

Pod urnim steklom nevtraliziramo alkalije s koncentrirano klorovodikovo kislino, da se vsebina zbistri. Pri tem tudi opazimo ali je vzorec popolnoma zreagiral. Če ostanki na dnu čaše škripljejo, je boljše začeti znova, le da talimo dalj časa. Boksit in masa G zahtevata daljši čas, morda tudi šamoti, ki imajo več aluminijevega oksida.

Raztopino previdno izparimo do približno 25 ml na način kot kaže slika 1. Ni nevarno, da bi se nam sušina na stenah čaše pripekla, ker dovajamo toploto na dno, toplo zračna blazina med tulcem in



Slika 1

Zaščita čašnih sten med izparevanjem silicijeve kisline

čša pa ni tako vroča, da bi se to zgodilo. Zgoščeni raztopini dolijemo 25 ml koncentrirane klorovodikove kisline, nato postavimo pokrito čašo v vodno kopel, ki je termostatirana na 70 — 80° C. Po nekaj minutah se temperatura več ali manj izenači.

Čašo postavimo na ogrevan elektromagnetski mešalnik. Vsebina naj se meša približno 1 minuto, da se izločene soli dobro zmešajo ali celo raztope. Med mešanjem dokapavamo po stenah čaše 18 ml temperirane 2,5 odstotne želatinske raztopine, da pride želatina v dotik z morebitnimi ostanki silicijeve kisline na robu čaše. Po 5 minutah dolijemo po stenah čaše 25 ml temperirane vode, v katero smo dali prej 1 ml želatinske raztopine. Mešamo še kakšno minuto, nakar čašo odstranimo. Ob zunanji rob čaše pristonimo magnet, ki potegne mešalo nase. Z magnetom drsimo proti vrhu čaše, z njim vred se vzdigne tudi mešalo nad tekočino. Tu ga obrizgamo z vodnim curkom, nato ga odstranimo s pinceto, čašo pa postavimo nazaj v vodno kopel še za približno 5 minut.

Vsebino filtriramo skozi srednje gost filter premera 12 cm. Ko pronikne vsa tekočina skozi filter, spravimo še ostanek iz čaše s toplo pralno vodicco. Če ne gre drugače, si pomagamo s koščkom filtra. Filter in oborino še dvakrat speremo s toplo izpiralno vodicco, nato pa še s toplo vodo.

Ko se tekočina dobro odcedi, damo filter z oborino vred v platinski lonček. Lonček smemo postaviti na kuhalnik le tako dolgo, da se posuši groba vlaga, ki se še izceja iz oborine. Oborina pa ostane še vlažna. Previdno sežgemo filter na gorilniku in končno še v peči ob dostopu zraka. Ko ostanek pobeli, zapremo peč in žgemo oborino pri 1100° C do konstantne teže. Ohlajeno oborino stehamo, nato odkadimo še silicijevo kislino, če to zahteva narava dela. Pri nas smo silicijevo kislino odkadili.

Želatinsko 2,5 odstotno raztopino pripravimo vsak dan svežo.

V 500 ml pralne vodice je 2 ml prvotne želatinske raztopine in največ 10 ml koncentrirane klorovodikove kisline.

### Analizni rezultati

Vzorci smo analizirali vzporedno po opisani želatinski in modificirani klasični metodi<sup>9</sup> (razpredelnica 1).

Dopustna vrednost odstopanja je izračunana po formuli:

$$a (0,1 + 0,01 \times \% \text{SiO}_2),$$

katero uporablja Eisenhüttenlaboratorium Band IV<sup>11</sup>; »a« pomeni faktor za število paralelek.

### SKLEP

Preiskali smo uporabnost želatinske metode za določevanje silicijeve kisline v glinah in v proti ognju odporni keramiki. Ugotovili smo, da je želatinska metoda uspešna tudi v analitiki keramičnih surovin in izdelkov.

Raznredelnica 1  
Rezultati z želatinsko in klasično metodo

St. S n o v	Želatinska metoda		Dov. odstopanje v %	Mod. klas. metoda	
	SiO <sub>2</sub> v %	Ostane v %		SiO <sub>2</sub> v %	Ostane v mg
1. Kvarcit Puconci	96,46	3,2	1,07	97,55	11,5
	97,36	1,8			
2. Opeka Dinas	96,56	3,2	1,06	96,68	4,4
	96,10	5,6			
3. Kvarcit Mirna	96,46	8,1	1,06	97,08	10,9
	96,22	5,4			
4. Žgana glina Zagreb	66,70	1,8	0,87	66,96	13,0
	66,90	1,3			
5. Žgana glina Arandjelovac	56,08	4,5	0,66	56,96	11,7
	56,46	3,3			
6. Žgana glina Vel. Opat	54,88	4,0	0,64	54,82	4,4
	54,62	8,5			
7. Surova glina Rudovci	48,98	0,0	0,58	48,92	
	48,46	6,6			
8. Surov boksit	16,04	17,0	0,27	—	
	17,36	14,4			
9. Surova glina Vrgin most	62,04	1,0	0,72	62,38	13,9
	61,83	2,8			
10. Sestava OC 18	21,94	3,4	0,31	22,05	27,0
	21,50	1,5			
11. Masa 2 NAB	78,80	1,1	0,88	78,95	20,0
	78,88	6,1			
12. Masa G	3,52	3,0	0,13	3,46	6,7
	3,22	5,3			

Metoda se šteje za hitro metodo, ker se izogne dolgotrajnemu izparevanju in sušenju, ki ju zahteva klasičen postopek. Predlagamo, da upoštevamo višji rezultat obeh paralelk, ker moramo računati, da ne izločimo silicijeve kisline kvantitativno. Ugotovljeni rezultati so pretežno v mejah dopustnega odstopanja.

### ZAHVALA

Raziskavo je naročila in denarno podprla Železarna Jesenice, za kar se ji na tem mestu zahvaljujemo.

### Literatura

- DRP 636945 von 5. April 1930
- N. A. BUICKOV, M. K. TANANAEV: Z anal. Chem. (1935), 103, 349
- L. K. WEISS: Arch. Eisenhüttenw. (1945), 15, 131
- E. HAMMARBERG: Jernkontorets Annaler (1947), 131, 199
- Analyse der Metalle I, Schiedsverfahren, str. 305, Springer-Verlag 1949
- L. C. PASZTOR: Gravimetric Determination of Silicon in the Presence of Boron, Anal. Chem. (1961), 33, 1270
- R. WEIRICH — A. WINKEL: Die chemische Analyse in der Stahlindustrie, Enke Verlag (1954), 29
- C. LITHEANU, G. H. RUSU, C. STRUSIEVICI: Acad. rep. populare Române Studii cercetări chim. (1955), 3, 55
- J. HODNIK: Določevanje silicijeve kisline po modificirani klasični metodi, s posebnim ozirom na obratne analize v metalurških laboratorijih, Vest. Slov. Kem. društva (1957), 4, 1
- Eisenhüttenlaboratorium Bd IV.: Verlag Stahleisen (1955), 7.

### ZUSAMMENFASSUNG

Es wurde die Zuverlässigkeit der Methode mit Gelatine für die Kieselsäurebestimmung in der feuerfesten Keramik und im Ton überprüft und als erfolgreich gefunden.

Im Vergleich mit der klassischen gilt diese Methode als Schnellmethode. Die einzelnen Ergebnisse sind im Vergleich mit denen der klassischen Analyse mehr als 80 % in den Grenzen der zulässigen Abweichungen.

### SUMMARY

Reliability of gelatine method for silica determination in refractory ceramics and in clay was tested and confirmed as successful.

The method holds good for quick-method in comparison with the classical one. The respective results are more than 80 per cent in limits of allowed deviations, in comparison with those of the classical analysis.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Испытана пригодность определения кремнёвой кислоты в глазах и жаростойкой керамики при помощи желатини и установлено что метод успешный.

В сравнении с классическими этот метод весьма скорый; свыше 80 % полученные результаты в сравнении с классическими методами находиться в допустимых пределах.



Odgovorni urednik: Jože Arh, dipl. inž. — Clani: Jože Rodič, dipl. inž., Janez  
Barborič, dipl. inž., Aleksander Kveder, dipl. inž., Edo Zagar, tehnični urednik.  
Tisk: CP »Gorenjski tiske«, Kranj