

# ŽELEZARSKI ZBORNIK

## VSEBINA

	Stran
KARBA AVGUST, železarna Jesenice EKONOMSKO TEHNIČNA ANALIZA UPORABE KISIKA V SM PEČI	1
COP STANKO, železarna Jesenice BAZICNA OPEKA ZA OBOKE IN KOMORE SM PEČI	7
LOGAR ZDRAVKO, železarna Store POVEČANJE VZDRŽNOSTI GLAVNEGA OBOKA SM PEČI V ŽELEZARNI STORE	14
PRESERN ALOJZ, Metalurški inštitut Ljubljana VPLIV PREDDEZOKSIDACIJE NELEGIRANEGA JEKLA Z OGLJIKOM 0,12 DO 0,2 NA VSEBNOST OKSIDNIH VKLJUČKOV	19
J. F. HODNIK, A. PREŠEREN, Metalurški inštitut Ljubljana, M. STERLE, Zavod za zdravstveno in tehnično varnost SRS IDENTIFIKACIJA POREKLA EKSOGENIH NEKOVINSKIH VKLJUČKOV V JEKLU Z RADIOAKTIVNIM CIRKOVIJEM	31
KVEDER ALEKSANDER, Metalurški inštitut Ljubljana VISOKOTEMPERATURNA CEMENTACIJA	38
CERNE FRANC, železarna Ravne TEKOČA KALILNA SREDSTVA, OPIS IN KONTROLA	45
RODIC ALENKA, železarna Ravne OBROBNA KALJIVOST CEMENTACIJSKIH JEKEL	64

1967 · LETO I **I**

II 229280

II 229280



2

## VSEBINA

Stran

- Karba Avgust, dipl. inž., železarna Jesenice  
**Ekonomsko tehnična analiza uporabe kisika v SM peči** . . . . . 1  
 DK 669.183.2 : 669.787.003.1
- Čop Stanko, dipl. inž., železarna Jesenice  
**Bazična opeka za oboke in komore SM peči** . . . . . 7  
 DK 669.183.2 : 666 : 76
- Logar Zdravko, železarna Štore  
**Povečanje vzdržnosti glavnega oboka SM peči v železarni Štore** . . . . . 14  
 DK 669.183.21136
- Prešern Alojz, dipl. inž., Metalurški inštitut Ljubljana  
**Vpliv preddezoksidacije nelegiranega jekla z ogljikom 0,12 do 0,2 na vsebnost oksidnih vključkov** . . . . . 19  
 DK 669.046.54
- J. F. Hodnik, A. Prešern, dipl. inž., Metalurški inštitut Ljubljana in M. Sterle, dipl. fizik, Zavod za zdravstveno in tehnično varnost SRS  
**Identifikacija porekla eksogenih nekovinskih vključkov v jeklu z radioaktivnim cirkovijem** . . . . . 31  
 DK 669.14 : 620.18
- Kveder Aleksander, dipl. inž., Metalurški inštitut Ljubljana  
**Visokotemperaturna cementacija** . . . . . 38  
 DK 621.785.52
- Černe Franc, dipl. inž., železarna Ravne  
**Tekoča kalilna sredstva, opis in kontrola** . . . . . 45  
 DK 621.785.66  
 ASM/SLA: W 28 p — 17.57, 1.54 : 11.(80)
- Rodič Alenka, dipl. inž., železarna Ravne  
**Obrobna kaljivost cementacijskih jekel** . . . . . 64  
 DK 543.7 : 669.71  
 ASM/SLA: J5d, J28 — 1.54, AYb, CNg

## Ekonomsko tehnična analiza uporabe kisika v SM peči

Članek obravnava ekonomiko uporabe kisika za pospeševanje procesa v SM pečeh. V prvem delu je naveden primer teoretičnega izračuna ekonomike iz sovjetske strokovne literature za 200 t SM peč. V drugem delu pa praktičen primer izračuna ekonomike uporabe kisika v martinarni Zelezarne Jesenice.

S pridobivanjem surovega jekla v kisikovih konvertorjih sta se tehnologija in ekonomika jeklarstva bistveno spremenili. SM peči so bile do prvih let po drugi svetovni vojni daleč najvažnejši agregat za proizvodnjo surovega jekla. V tistem obdobju so proizvajale preko 80 % vse svetovne proizvodnje surovega jekla.

Po letu 1950, ko so začeli kisikovi konvertorji svojo zmagovito pot v jeklarstvo, pa se je pričelo stanje najprej počasi, potem pa vedno hitreje spreminjati. Ti novi agregati so kmalu pokazali vse svoje velike prednosti in SM peč je pričela vedno bolj izgubljati svojo vodilno vlogo. Na drugi strani pa so tudi električne jeklarske peči velikih zmogljivosti doprinesle k zatonu SM peči.

Posledica vsega tega je bila, da se je v letu 1966 znižal delež SM peči v svetovni proizvodnji surovega jekla pod 60 % in še naprej pada.

Vendar je v času razvijanja procesa v kisikovih konvertorjih tudi SM peč doživela bistvene spremembe v svojem procesu. Tudi tu je odigral kisik svojo vlogo. Z vedno večjo uporabo kisika za pospeševanje žilavljenja in intenziviranje zgorevanja v SM pečeh, je naraščala njinova storitev. To pa je dalo SM peči, ob primernih cenah vložka še vedno določeno konkurenčno sposobnost s kisikovim konvertorjem. S tem si je ta jeklarski agregat podaljšal življenje za določeno obdobje, vendar kljub temu ni dvoma, da je njegova prihodnost vedno manj rožnata.

### Dobre in slabe strani uporabe kisika v SM peči

Uporaba kisika je pripomogla k skrajšanju procesa v SM peči in s tem k povečanju proizvodnje. Istočasno pa ima zaradi večje toplotne obremenitve, predvsem zgornjega ustroja peči za posledico slabšo vzdržnost obzidave in s tem povečanje števila remontov. Iz tega sledi, da ima intenzivna uporaba kisika v SM peči dobre in slabe strani.

Dobre strani so:

— skrajšanje šaržnega časa, oziroma povečanje storitve peči v tonah na uro;

— znižanje porabe goriva.

Slabe strani so:

— večja poraba kisika,

— manjša vzdržnost obzidave peči,

— slabše izkoriščanje koledarskega fonda peči zaradi večjega števila remontov in s tem nižja letna proizvodnja.

Jasno je, da imajo vse naštetje dobre in slabe strani uporabe kisika v SM pečeh tudi svoj odraz na ekonomiko samega procesa. Zato ni vedno zanesljivo, da je večja uporaba kisika in s tem povečanje storitve na SM pečeh tudi dejansko ekonomsko upravičena. Oziroma drugače povedano, ni nujno, da pomeni povečanje uporabe kisika na SM pečeh tudi znižanje proizvodnih stroškov.

Če želimo ugotoviti, kaj nam je večja uporaba kisika pri procesu v SM pečeh dejansko prinesla, potem je treba analizirati posamezne faktorje, na katere ima uporaba kisika svoj pozitiven in negativen vpliv. Šele takšna analiza nam lahko resnično odgovori na vprašanje, ali je obratovanje s kisikom ekonomsko upravičeno ali ne.

### Teoretičen izračun ekonomičnosti uporabe kisika na 2 tonski SM peč

Sovjetski avtor N. P. Bannji navaja v svoji knjigi o tehnično ekonomskih izračunih v črni metalurgiji tudi primer izračuna ekonomičnosti za uporabo kisika na 200-tonski SM peč.

Bannji jemlje kot osnovo za svoj izračun zgoraj navedene slabe in dobre strani uporabe kisika. Skrajšanje šaržnega časa pomeni na eni strani odgovarjajoče povečanje storitve peči, na drugi strani pa poslabšanje vzdržnosti obzidave poveča število remontov. Ob upoštevanju enakega časa potrebnega za vsak remont pomeni to skupno povečanje časa, ko peč ne obratuje, oziroma poslabšanje izkoriščanja koledarskega fonda peči. S tem pa se zniža tudi skupna letna proizvodnja, ker je peč v vsem letu zaradi več remontov manj časa obratovala. Zato bo skupen odstotek zastojev in s tem tudi njihova količina narasla v vsem letu za faktor  $d$  krat.

Faktor  $d$  lahko izračunamo po enačbi:

$$\frac{365 \times 24}{D_{1a1} + \frac{D \cdot a \cdot n}{1-n}} : \frac{365 \times 24}{D \cdot a + \frac{D \cdot a \cdot n}{1-n}} = \frac{D \cdot a}{D_{1a1} (1-n) + D \cdot a \cdot n} = d$$

D — obratovalna kampanja brez uporabe kisika, število šarž;

D<sub>1</sub> — obratovalna kampanja pri uporabi kisika, število šarž;

a — čas trajanja šarže brez uporabe kisika, v urah;

a<sub>1</sub> — čas trajanja šarže z uporabo kisika, v urah;

n — zastoji v skupnem koledarskem fondu, v %.

Iz tega sledi, da bo pri dejanskih pokazateljih trajanja šarž in obratovalne kampanje, odgovarjajoče določeni uporabi kisika, odstotek zastojev enak faktorju nd. Zato lahko letno proizvodnjo P 200-tonske SM peči, pri obratovanju s kisikom, izračunamo po enačbi

$$P = \frac{200 \times 0,94 \times 24}{a_1} \times 365 (1 - nd)$$

a<sub>1</sub> — čas trajanja šarže pri določeni uporabi kisika.

Letna proizvodnja peči pri uporabi kisika presega ta pokazatelj pri navadnem obratovanju za faktor b krat. Faktor b lahko izračunamo po enačbi:

$$b = \frac{200 \times 0,94 \times 24}{a_1} \times 365 (1 - n \cdot d) : \frac{200 \times 0,94 \times 24}{a} \times 365 (1 - n) = \frac{a (1 - nd)}{a_1 (1 - n)}$$

Iz spodnje tabele so razvidni pokazatelji storitve letne proizvodnje ter faktorja d in b za 200-tonsko SM peč pri različnih količinah uporabljenega kisika.

Poraba kisika v m <sup>3</sup> /t jekla	storitev (t/h)	koeficient naraščanja stor. (t/h)	faktor d	zastoji n <sup>o</sup>	letna proizvod. (000 t)	faktor b
šarža brez kisika	18,8	1,000	1,000	10,00	148,2	1,000
10	19,8	1,053	1,047	10,47	155,1	1,046
20	22,1	1,175	1,203	12,03	172,4	1,150
30	25,1	1,335	1,400	14,00	188,8	1,274
40	31,3	1,670	1,760	17,60	226,2	1,526
50	34,2	1,820	1,973	19,73	240,0	1,620
60	37,6	2,000	2,222	22,22	256,1	1,728

Ce bi uspeli tudi pri uporabi kisika obdržati enako vzdržnost obzidave kot takrat, ko obratujemo brez kisika, potem bi bili obratovalni pokazatelji znatno boljši. To je razvidno iz spodnje tabele.

Poraba kisika v m <sup>3</sup> /t jekla	storitev (t/h)	koeficient naraščanja stor. (t/h)	faktor d	zastoji n <sup>o</sup>	letna proizvod. (000 t)	faktor b
šarža brez kisika	18,8	1,000	1,000	10,00	148,2	1,000
10	19,8	1,053	1,047	10,47	155,1	1,046
20	22,1	1,175	1,159	11,59	172,4	1,155
30	25,1	1,335	1,290	12,90	191,1	1,290
40	31,3	1,670	1,562	15,62	231,2	1,560
50	34,2	1,820	1,681	16,81	249,2	1,689
60	37,6	2,000	1,818	18,18	269,4	1,818

Pri izračunu ekonomičnosti uporabe kisika je treba upoštevati vse faktorje, ki na to vplivajo. Glavni učinek uporabe kisika pri SM procesu se pokaže v povečani storitvi peči. To pa ima še samo po sebi za posledico znižanje proizvodnih, predvsem fiksnih stroškov. Prav tako pa je nižja tudi poraba goriva. Negativno pa vpliva povečanje stroškov za remonte in za kisik. Vsi ti vplivi so razvidni iz naslednje enačbe:

$$S = \left( F - \frac{F}{b} \right) + \left( R - \frac{R \cdot d}{b} \right) + (t - t_k) - x \cdot y$$

S — zvišanje ali znižanje stroškov za tono jekla pri uporabi kisika, din/t;

R — stroški remontov pri obratovanju brez kisika, din/t;

t — stroški za gorivo pri obratovanju brez kisika, din/t;

t<sub>k</sub> — stroški za gorivo pri obratovanju s kisikom, din/t;

F — ostali fiksni stroški pri obratovanju brez kisika, din/t;

x — poraba kisika, m<sup>3</sup>/t;

y — cena kisika, din/m<sup>3</sup>.

Očitno je, da je meja ekonomičnosti uporabe kisika takrat, kadar je S = 0, oziroma po enačbi;

$$\left( F - \frac{F}{b} \right) + \left( R - \frac{R \cdot d}{b} \right) + (t - t_k) = x \cdot y$$

Stopnja ekonomske učinkovitosti uporabe kisika v SM peči je določena na eni strani s specifično porabo in ceno kisika, na drugi strani pa s povečanjem letne proizvodnje ter znižanjem porabe goriva. Proizvodnost same peči pa je določena s trajanjem šarže in dolžino obratovalne kampanje. S tem pa so povezani tudi stroški za remonte. Če izhajamo iz prejšnje enačbe lahko izračunamo največjo ceno kisika, pri kateri je njegova uporaba še ekonomsko upravičena na podlagi enačbe:

$$y_{\max} = \frac{F(b-1) + R(b-d) + b(t-t_k)}{x \cdot b}$$

$$y_{\max} = \frac{S}{x} + y$$

Poleg povečanja storitve ima na ekonomičnost uporabe kisika v SM peči znaten vpliv tudi vzdržnost obzidave, oziroma trajanje obratovalne kampanje. Zato je mogoče tudi vpliv tega faktorja ugotoviti s pomočjo odgovarjajočih enačb.

Iz že znane enačbe:

$$S = \left( F - \frac{F}{b} \right) + \left( R - \frac{R \cdot d}{b} \right) + (t - t_k) - x \cdot y$$

oziroma:

$$S = (F + R + t) - \left( \frac{F}{b} + \frac{Rd}{b} + t_k + x \cdot y \right),$$

lahko ugotovimo pri kateri najkrajši obratovalni kampanji je uporaba kisika še ekonomična. Če predpostavljamo, da je  $S = 0$  (to je, da stroški pri uporabi kisika ne prekoračijo stroškov pri obratovanju brez kisika), dobimo

$$F + R + t = \frac{F}{b} + \frac{Rd}{b} + t_k + x \cdot y$$

Če upoštevamo, da je  $b = \frac{a(1-nd)}{a_1(1-n)}$  in vsta-

vimo to v zgornjo enačbo, dobimo

$$d = \frac{B \cdot a - F \cdot a_1(1-n)}{B \cdot a \cdot n + R a_1(1-n)}$$

kjer je

$$B = (F + R + t - t_k - x \cdot y)$$

Enačba je naslednja:

$$\left( F - \frac{F}{b} \right) + \left( R - \frac{Rd}{b} \right) + t - \left( \frac{0,8t}{b} + 0,2t \right) - x \cdot y = S$$

kjer pomeni  $\frac{0,8t}{b} + 0,2t -$

empirično ugotovljeno razmerje med naraščanjem storitve peči in porabo goriva.

Če vstavimo v zgornjo enačbo enačbi za faktorja  $b$  in  $d$  dobimo

$$a_1 = \frac{a(N - Mn - R)}{M(1-n)}$$

kjer je

$$N = (F + R + t) - (0,2t + x \cdot y + S)$$

$$M = (F + 0,8t)$$

S pomočjo zgornjih enačb lahko izračunamo rentabilnost uporabe kisika v SM peči ob upoštevanju posameznih faktorjev, ki imajo pri tem svoj vpliv. Seveda potrebujemo za to odgovarjajoče podatke, ki pa že sami po sebi zahtevajo daljšo obratovalno dobo. Brez dvoma pa je Bannji s svojimi izvajanjmi in enačbami pokazal kako lahko takšen izračun izvedemo.

$$\text{Iz enačbe } d = \frac{D \cdot d}{D_1 a_1 (1-n) + D a n} \text{ dobimo}$$

$$D_1 = \frac{D a (1-nd)}{a_1 d (1-n)}$$

Če vstavimo v to enačbo  $d$  izračunan prej, dobimo enačbo, na podlagi katere lahko izračunamo najkrajšo obratovalno kampanjo, pri kateri je uporaba kisika še upravičena. To pa zato, ker omogoča povečanje proizvodnje, čeprav pri tem ni znižanja stroškov.

Iz spodnje tabele je razviden vpliv obratovalne kampanje pri različni uporabi kisika na povečanje proizvodnje.

Poraba kisika m <sup>3</sup> /t	obratov. kampanja število šarž	letna proizv. peči v 000 ton
10	432	154,7
20	393	168,9
30	353	186,0
40	305	217,8
50	347	226,1
60	290	248,5

Ob upoštevanju vseh do zdaj navedenih pokazateljev lahko pridemo do končnih enačb, kjer so zajeti vsi ti pokazatelji. Tako lahko na podlagi enačbe, ki nam prikazuje ekonomičnost uporabe kisika, ugotovimo, da mora biti znižanje stroškov pogojeno s šaržnim časom, enakim faktorju  $a_1$ .

#### Uporaba kisika v martinarni Železarne Jesenice

V martinarni jeseniške železarne smo že pred leti pričeli uporabljati kisik v SM pečeh. Ker smo ga imeli takrat na razpolago le omejene količine, smo ga uporabljali samo za pospeševanje žilavljenja, tako da smo ga s pomočjo jeklene cevi direktno pihali v kopel. Povprečno smo porabili 6 Nm<sup>3</sup> kisika na tono proizvedenega jekla.

Ob koncu decembra leta 1965 je pričela obratovati v Železarni Jesenice nova kisikarna s proizvodno zmogljivostjo 100 ton kisika dnevno. S tem smo dobili tudi v martinarni možnost za večjo uporabo kisika pri pospeševanju procesa v SM pečeh. Poleg tega, da smo še naprej pospeševali žilavljenje z direktnim pihanjem v kopel, smo uvedli tudi dodajanje kisika skozi mazutne gorilce. S tem smo pričeli intenzivirati zgorevanje. Meritve v letu 1966 so pokazale, da je poraba kisika na SM pečeh narastla od prejšnjih 6 na 22,4 Nm<sup>3</sup> na tono jekla.

Ob znatno večji porabi kisika je narastla tudi storitev SM peči ob istočasni znižani porabi goriva. Glavni obratovalni pokazatelji za leto 1965 in 1966 so razvidni iz spodnje tabele:

	1965	1966
letna proizvodnja (ton)	322.575	318.410
storitev od šarže do šarže (t/h)	6,39	7,61
čas od šarže do šarže (h)	9 h 18 min.	7 h 44 min.
poraba toplote, (kcal/t 10 <sup>6</sup> )	1.539	1.408
poraba kisika (Nm <sup>3</sup> /t)	6,0	22,4
izkoriščanje koledarskega fonda (‰)	82,29	68,21

Tabela zahteva določene obrazložitve. Primerjava povprečne storitve SM peči pokaže, da je v letu 1966 narastla v primerjavi z letom 1965 za 19 ‰. Isto velja tudi za čas od šarže do šarže. Tudi poraba toplote je v tem razdobju padla za 131.000 kcal na tono jekla.

Če pa pogledamo skupno letno proizvodnjo, vidimo, da je bila v letu 1966 za 4.163 ton nižja kot v letu 1965. Prav tako je tudi velika razlika v izkoriščanju koledarskega fonda peči, saj je bil v letu 1966 za 14,08 ‰ nižji kot leta 1965. Glavni vzrok tej razliki v skupni proizvodnji in izkoriščanju koledarskega fonda je v tem, da je leta 1965 obratovalo vse leto šest SM peči, lani pa le pet. Tako v letu 1966 vedno po dve SM peči nista obratovali. Za takšen način obratovanja smo se odločili iz razloga, ker zaradi zapoznelega pričetka obratovanja bluminga in nove valjarne trakov-Steckel, ni bilo večjih potreb po surovem jeklu. Poleg tega smo imeli manj težav pri izvedbi rekonstrukcije v livni jami martinarne. Izvedli smo tudi rekonstrukcijo SM peči V in K, ki sta trajali več mesecev. Seveda pa je k temu pripomoglo tudi povečanje proizvodnje kot posledica večje porabe kisika.

Vendar smo imeli v letu 1966 še druge težave, ki so bile v glavnem povezane s prehodom na vli-vanje 5 tonskih ingotov in 8 tonskih bram. Tudi posledica teh težav je bila nižja proizvodnja.

Obratovanje s petimi pečmi je bilo v tem letu ugodno tudi zaradi tega, ker je bila posledica večje porabe kisika tudi slabša vzdržnost obzidave peči. Tako je bilo večkrat obratovanje s petimi pečmi potrebno tudi iz razloga, ker sta bili po dve peči naenkrat v remontu. Obratovalne kampanje peči so se med letom skrajšale povprečno od 371 šarž v letu 1965 na 312 šarž v letu 1966.

Jasno je, da je imelo obratovanje s petimi pečmi kljub povečani storitvi tudi vpliv na rentabilnost porabe kisika. Znižanje izkoriščanja koledarskega fonda peči pomeni v vsakem primeru povečanje proizvodnih stroškov, saj fiksni in delno tudi giblivi stroški tečejo naprej kljub temu, da peč ne obratuje. Zato je bilo s stališča obratne

ekonomike zelo zanimivo vprašanje, ali je bila povečana poraba kisika, predvsem z ozirom na slabše izkoriščanje koledarskega fonda in nižjo letno proizvodnjo, ekonomsko pozitivna ali ne.

Pri večji uporabi kisika v SM pečeh je zaradi večjih toplotnih obremenitev večja tudi obraba proti ognju odporne obzidave in s tem večja poraba opeke. Vendar pri tem gre dejansko le za zgornji ustroj SM peči, kar smo v naši martinarni tudi v praksi ugotovili. Zato bom pri primerjanju stroškov povezanih s proti ognju odporno obzidavo upošteval samo magnezitno in krommagnezitno opeko, ki smo jo uporabili za obzidavo zgornjega ustroja SM peči pri normalnih in vročih remontih. Poleg tega se s takšno primerjavo tudi izognem netočnostim, ki bi nastale v primeru, če bi upošteval celotno porabo opeke, zaradi rekonstrukcij izvedenih v letu 1966 na SM pečeh K in V.

Ob upoštevanju enake povprečne cene za magnezitno in krommagnezitno opeko iz leta 1966, njene porabe v obeh letih ter stroškov za usluge »Vatrostalne«, ki je opravljala zidarska dela, sem izračunal naslednje stroške na tono jekla:

leto 1965	leto 1966
3.020 S din/t	3.890 S din/t

#### Ekonomski izračun uporabe kisika v letu 1966

Pri izračunu ekonomske upravičenosti večje uporabe kisika v letu 1966 nisem mogel uporabiti načina sovjetskega avtorja Bannjija, ki sem ga prej navedel. Vzrok je bil v tem, ker znatno slabše izkoriščanje koledarskega fonda leta 1966 v primerjavi z letom 1965 ni bila samo posledica večje uporabe kisika. Zato sem izračun izvedel drugače. Način Bannjija pa lahko pride v poštev v primeru, če so podani vsi zahtevani pogoji.

Za ugotovitev rentabilnosti uporabe 22,4 Nm<sup>3</sup> kisika na tono proizvedenega jekla v letu 1966, je treba napraviti primerjavo z letom 1965, ko je bila poraba kisika samo 6 Nm<sup>3</sup>/t. Vendar so pri tej primerjavi nastale določene težave. Glavni vzrok je bila uvedba gospodarske reforme v juliju leta 1965, ki je imela za posledico določeno zvišanje cen različnim materialom in uslugam. Primerjava med obema letoma, ob upoštevanju dejanskih cen, bi pokazala napačno sliko. Zato sem moral pri izračunu vzeti enake cene tako za leto 1965, kakor tudi za leto 1966. V obeh primerih sem upošteval cene iz leta 1966, tehnične pokazatelje pa takšne kot so bili dejansko doseženi v obeh letih.

Pri primerjavi bom upošteval samo predelovalne stroške, čeprav je znano, da ima uporaba kisika določen vpliv tudi na znižanje izplena v martinarni. Vendar je dejansko poslabšanje izplena v praksi težko ugotoviti.

Pri primerjavi predelovalnih stroškov lahko razvrstimo posamezne postavke v tri skupine:

1. Postavke, ki jih je mogoče na podlagi odgovarjajočih pokazateljev direktno izračunati. Sem spadajo osebni dohodek, gorivo (mazut), kisik in remontni.

2. Postavke, ki so gibljive in se njihova vrednost v din/t z višjo ali nižjo proizvodnjo ne spreminja. Sem spadajo kokile, livne plošče, opeka za livno jamo, različni livni material in podobno.

3. Postavke, ki so fiksne in se zato z višjo ali nižjo proizvodnjo spreminja tudi njihova vrednost

v din/t. Sem spadajo predvsem stroški vloženih sredstev (amortizacija, obresti na osnovna sredstva itd.) ter upravna režija. Poleg tega lahko prištejemo v to skupino praktično tudi ostale postavke, kot redno in investicijsko vzdrževanje, razne usluge in podobno.

Razlika v stroških za osebni dohodek, mazut, kisik in remonte med letom 1965 in 1966 je naslednja (vse vsote so navedene v starih dinarjih):

	cena	1965		1966		razlika
		količ.	din/t	količ.	din/t	
OD	807 din/h	1,342.052 h	3.330	1,128.656 h	2.850	— 480
mazut	24.800 din/t	49.320 t	3.790	44.844 t	3.490	— 300
kisik	20 din/kg	8,5 kg/t	170	32 kg/t	640	+ 470
remonti	—	—	3.020	—	3.890	+ 870
skup. + razlika			10.310		10.870	+ 560

Izračun za te štiri postavke pokaže, da je bilo obratovanje v letu 1966 z uporabo 22,4 Nm<sup>3</sup> kisika na tono za 560 din/t dražje kot pri uporabi 6 Nm<sup>3</sup>/t v letu 1965.

Tisti del zgoraj navedenih predelovalnih stroškov, na katere vpliva višina proizvodnje, je znašal po obračunu iz leta 1966 — vsoto 2,544 milijarde din. V letu 1965 je bilo proizvedeno 322.573 ton SM jekla in v letu 1966 318.410 ton. Stroški za tono jekla so znašali:

$$1966 \quad 2,544.000.000 : 318.410 = 7.989 \text{ din/t}$$

$$1965 \quad 2,544.000.000 : 322.573 = 7.886 \text{ din/t}$$

$$\text{Razlika} \quad 103 \text{ din/t}$$

Skupno povečanje stroškov v primerjavi med letoma 1965 in 1966:

$$560 \text{ din/t}$$

$$103 \text{ din/t}$$

$$663 \text{ din/t}$$

Zgornja številka nam pove isto, kar je dokazal tudi Bannji s svojimi enačbami. Ekonomska uporaba kisika zahteva ne samo večjo storitev SM

peči, temveč predvsem večjo skupno proizvodnjo, kajti dodatne stroške za kisik in večje število remontov je treba nadomestiti z znižanjem stroškov za osebne dohodke, goriva in ostalih predelovalnih stroškov, na katere vpliva višina proizvodnje. To pa je možno doseči le s povečanjem skupne letne proizvodnje, ne pa samo s povečanjem storitve peči ob istočasnem slabšem izkoriščanju koledarskega fonda. Vzroke nižje letne proizvodnje v letu 1966 sem že navedel. Vendar končni rezultat je bil podražitev proizvodnje.

#### Ekonomski izračun uporabe kisika v februarju 1967

V februarju leta 1967 je proizvedla jeseniška martinarna 28.976 ton SM jekla. To je ob upoštevanju, da ima ta mesec samo 28 dni, doslej najvišja mesečna proizvodnja pri obratovanju s petimi pečmi. Zato bo zanimiva primerjava ekonomike pri uporabi enakih količin kisika med februarjem 1967 in letom 1966.

Primerjava obratovalnih pokazateljev med leti 1965, 1966 in februarjem 1967:

	1965	1966	febr. 67
Storitev od šarže do šarže (t/h)	6,39	7,61	8,62
čas od šarže do šarže (h)	9 h 18'	7 h 44'	7 h 13'
poraba toplote (kcal/t × 10 <sup>6</sup> )	1.539	1.408	1.387
poraba kisika (Nm <sup>3</sup> /t)	6,00	22,4	22,0
izkoriščenost koledarskega fonda (%)	82,29	68,21	71,45

Pri tej primerjavi upoštevam enake cene kot v letu 1966. Isto velja tudi za stroške remontov, le pri osebnem dohodku sem moral upoštevati večjo mesečno proizvodnjo v februarju 1967 kot

je bila v poprečju leta 1966. Zato je višina osebne dohodke na uro plačana po ceniku tudi višja, medtem ko je kvalitetni asortiment upoštevan takšen kot je bil v poprečju leta 1966.



Tabela kaže primerjavo stroškov za osebni dohodek, mazut, kisik in remonte med letom 1966 in februarjem 1967:

	1966			febr. 1967			razlika
	cena	količ.	din/t	cena	količ.	din/t	
OD	807 d/t	1,128.656 h	2.850	880.—	79.747 h	2.420	— 430 din/t
mazut	24.800 d/t	44.844 t	3.490	—	4.019 t	3.440	— 50 din/t
kisik	20 d/kg	32 kg/t	640	—	31,4 kg/t	630	— 10 din/t
remonti	—	—	3.890	—	—	3.890	—
<b>s k u p a j</b>			<b>10.870</b>			<b>10.380</b>	<b>— 490 din/t</b>

Da bom lahko primerjal tudi ostale postavke, izračunam letno proizvodnjo v letu 1967 ob predpostavki, da bi bila proizvodnja v poprečju vsak mesec takšna kot v februarju:

$$28.976 \times 12 = 347.712 \text{ ton}$$

Ob upoštevanju enakih stroškov, ki se s proizvodnjo spreminjajo, kot v letu 1966, dobim med letom 1966 in 1967 naslednjo primerjavo:

$$1966 \quad 2,544.000.000 : 318.410 = 7.989.— \text{ din/t}$$

$$1967 \quad 2,544.000.000 : 347.712 = 7.316.— \text{ din/t}$$

$$\text{Razlika} \quad \quad \quad 673.— \text{ din/t}$$

Skupno znižanje stroškov med letom 1966 in februarjem 1967 je:

$$490.— \text{ din/t}$$

$$673.— \text{ din/t}$$

$$1.163.— \text{ din/t}$$

Ta primerjava pokaže kakšen vpliv ima pri uporabi kisika večja skupna proizvodnja. Kajti šele v takšnem primeru pride ekonomika prav do izraza.

#### Primerjava ekonomike in proizvodnje

Na osnovi zgornjih podatkov lahko izračunamo pri kateri letni oziroma poprečni mesečni proizvodnji je uporaba 22 Nm<sup>3</sup> kisika na tono jekla v primerjavi s 6 Nm<sup>3</sup>/t še ekonomsko upravičena. Pri tem moram upoštevati zvišanje in znižanje stroškov za leto 1965 in 1966 ter februar 1967.

Razlika med proizvodnjo v letu 1966 in predvideno proizvodnjo v letu 1967, če bi bila poprečna mesečna proizvodnja 28.976 ton, je:

$$347.712 \text{ ton}$$

$$- 318.410 \text{ ton}$$

$$+ 29.302 \text{ ton}$$

Med predvideno letno proizvodnjo v letu 1967 v višini 347.712 ton in proizvodnjo leta 1966 v višini 318.410 ton je razlika v nižjih proizvodnih stroških za 1.163 din/t. Prav tako pa je razlika tudi v stroških proizvodnje med letom 1965 in 1966 — in sicer za 663 din/t zvišanje v letu 1966. Torej je bila skupna razlika med letom 1966 na eni in letoma 1965 ter 1967 na drugi strani v seštevku izračunanega zvišanja in znižanja:

$$\text{zvišanje} \quad 1965/1966 \quad 663.— \text{ din/t}$$

$$\text{znižanje} \quad 1966/1967 \quad 1.163.— \text{ din/t}$$

$$\text{razlika} \quad 1965/1966/1967 \quad 1.826.— \text{ din/t}$$

Želim ugotoviti pri kateri letni proizvodnji bo z oziroma na zgoraj navedene številke ekonomika uporabe 22 Nm<sup>3</sup>/t kisika enaka ničli. To bomo dosegli pri tisti letni ali poprečni mesečni proizvodnji, kjer od skupne razlike v stroških 1.826 din/t ne bo več zvišanja za 663 din/t. Pri letni razliki proizvodnje za 29.302 ton nastane tudi razlika v stroških za 1.826 din/t. Če znižamo to razliko v stroških za 663 din/t in tako ne bo niti zvišanja niti znižanja, odgovarja ta razlika proizvodnji:

$$\frac{663}{1826} \times 29.302 = 10.640 \text{ ton}$$

Iz tega sledi, da je pri letni proizvodnji:

$$318.410 \text{ ton}$$

$$+ 10.640 \text{ ton}$$

$$329.050 \text{ ton}$$

oziroma poprečni mesečni proizvodnji:

$$329.050 : 12 = 27.420 \text{ ton}$$

uporaba 22 Nm<sup>3</sup>/t kisika še ekonomična. Ta ekonomičnost je v tem, da omogoča povečanje proizvodnje pri istih stroških. Povečanje mesečne proizvodnje pri tej uporabi kisika pomeni znižanje in zmanjšanje proizvodnje odgovarjajoče zvišanje stroškov — pri enakih cenah.

#### Zaključek

Na podlagi Bannjivih enačb, kakor tudi praktičnih izračunov ekonomike pri uporabi kisika v jeseniški martinarni lahko zaključimo: kisika v SM pečeh osebni dohodek, poraba kisika in goriva ter stroški remontov.

1. Neposredno vplivajo na ekonomiko uporabe

2. Posreden, vendar prav tako močan vpliv pa ima skupna letna proizvodnja in s tem povezano izkoriščanje koledarskega fonda.

3. Povečanje storitve posameznih SM peči nima ekonomskega učinka, če ni s tem dosežena tudi večja letna proizvodnja.

4. Za ugotovitev dejanskega stanja ekonomičnosti uporabe kisika je nujno treba izdelati odgovarjajočo analizo. Pri tem lahko uporabimo način, ki ga navaja Bannji, ali pa način, pri katerem uporabljamo kot osnovo finančni obračun.

Strokovna literatura:

N. P. Bannji — Tehniko ekonomičeskie razčeti v černo metalurgii

## Bazična opeka za oboke in komore SM peči

Vzdržnost obokov SM peči pri plinski in mazutni kurjavi ter pri dodatku zgorevnega kisika. Vpliv kisika na vzdržnost zadnjih sten in gredel v komorah.

Zahtevam za povečano proizvodnost SM peči se mora prilagoditi industrija proti ognju odpornega gradiva. Pri kurjenju peči z generatorskim plinom je toplotna obremenitev peči znatno manjša kot pri mazutu, saj odpade na m<sup>2</sup> površine kopeli in na uro pri hitrem zakladanju le 300.000 kcal, dočim znaša pri dodatku zgorevnega kisika toplotna obremenitev že do 450.000 kcal/m<sup>2</sup>, h.

Plinska in mazutna kurjava se bistveno razlikujeta. Pri kurjenju s plinom poteka zgorevanje preko difuzije zraka s plinom. Reakcije zgorevanja so počasne. Pri kurjenju z oljem plamen zaradi velikega impulza sesa zrak, temperatura plamena je visoka in povzroča oksidacijo in izparevanje železa. Pretakanje zgorelih plinov z visoko temperaturo in veliko energijo povzroča močno obrabo proti ognju odporne obzidave peči. Če dodajamo plamenu kisik, se pogoji še zaostrijo, poviša se temperatura plamena ter oksidacija in izparevanje železa iz vložka.

Oksidacija kopeli s kisikom je še ostrejša kot dodajanje kisika plamenu. Reakcije med kisikom in kopeljo potekajo v ozkem območju tik pred cevjo, že tako visoka temperatura med oksidacijo se zaradi znatnih eksotermnih reakcij še povečuje. Oksidacija in izparevanje železa dosežeta višek. Poleg tega žilindra, ki brizga proti zadnji steni peči in jaškom ter valovanje taline mehansko in kemično nažira proti ognju odporno obzidavo peči. Difuzija železovih oksidov v zunanji sloj opeke ima za posledico reagiranje teh z opeko, kar zmanjšuje odpornost proti ognju in povečuje volumen opeke. To naraščanje opeke je posebno izrazito pri večji uporabi kisika. Zahteva jeklarjev za manj porozno in dobro termostatično opeko je zato toliko bolj upravičena. Razni postopki danes že zagotavljajo tako kvaliteto, kot npr.: s katrautom prepojena opeka, magnezit-kromitna in zelo čista magnezitna opeka. Armiranje opeke znotraj in oblaganje s pločevino zunaj preprečuje odpadanje proti plamenu obrnjenih slojev opeke, seveda, če je proti ognju odporno gradivo dobro in potrebujemo armaturo le za vezanje odluščenih slojev. Manj škodljivih primesi, ki tvorijo steklasto fazo zaradi difuzije oksidov, običajno 3—5 cm za delovno površino, pa je osnovni pogoj za dobro proti ognju odporno gradivo. Opeka z najmanj 98 % MgO je danes že precej pogosta.

Magnezitno, krom-magnezitno in magnezit-kromitno gradivo (imenovano »črno«) se danes vse bolj uporablja tudi v spodnjih delih peči. Nekdaj so bili jaški iz »črnega« gradiva, danes so obzidani s tem že žilindrniki in tudi del gredelov v komorah.

Večletni poskusi in prizadevanja proizvajalcev proti ognju odpornega gradiva so dovedli do uspehov. Tehnologija proizvodnje jekla in večanje proizvodnosti postavljata prednje vedno nove naloge, ki jih je treba z novim gradivom tudi reševati. Kisikovi postopki za proizvodnjo jekla (LD in posebno še Kaldo) so dali povod za obsežne raziskave v tej smeri. Največjo vzdržnost LD/AC konvertorja z magnezitno obzidavo znaša 939 šarž. Dosegli so jo pri Richard Thomas — Baldwins v Angliji<sup>1</sup>.

### a) Vzdržnost obokov pri plinski in mešani kurjavi

Prvi obok iz krommagnezita smo vgradili na Jesenicah. V tem času so bili oboki iz silika opeke ter so vzdržali do 550 šarž. Z vgrajevanjem domačih proti ognju odpornih obokov smo v začetku dosegli slabe rezultate, pozneje pa boljše. Poprečna vzdržnost obokov je prikazana v tabeli 1.

1. Do vključno leta 1954 so bile vse peči kurjene z generatorskim plinom, vzdržnost obokov je bila od 725—2170 šarž. Oboki so bili rebrasti z dodatno opeko.

2. V letih 1955—1956 smo pričeli uporabljati delno že opeko »Magnohroma«, vzdržnost se je gibala od 435—1084 šarž.

3. V letu 1957 so bili vsi oboki iz opeke »Magnohroma«, razen na peči 1, kjer smo prvi njihov obok vgradili leta 1958.

4. Kurjava je bila v letih 1957—1958 plinska, razen na peči 1 in 3, kjer smo kurili dodatno z mazutom. Od leta 1959 so imele vse peči dodatno mazutno kurjavo.

5. Kisik za oksidacijo smo začeli uporabljati leta 1960. V letu 1966 smo na vseh pečeh dodajali kisik za zgorevanje v količini 19 kg/t.

Poraba opeke za oboke SM peči je bila zelo različna in je dosegala:

v letu 1963 — 5,28 kg/t jekla  
v letu 1964 — 4,66 kg/t jekla  
v letu 1965 — 4,76 kg/t jekla  
v letu 1966 — 4,70 kg/t jekla

Tabela 2

Tabela 1 — Vzdržnost obokov

leto	način kurjenja	1	2	3	4	5	6	7	poprečno	gradivo
1953	plin	2.170×	1.336	1.158	725	—	—	—	1.073	Radex, Ankrom
1954	plin	788	1.754	1.028	778	—	907	—	1.051	Radex, Ankrom
1955	plin	—	—	593	867	—	849	—	770	Brohltal - Didier
1956	plin	933	1.084	539	765	459	435	—	706	Radex E, Ankrom
1957	delno mazut	931	773	500+	736	432	558	—	655	Magnohrom
1958	ostalo plin	500++	452	329	695	537	407	323	463	Magnohrom
1959	mešano plin	461	453	403	542	357	464	324	429	Magnohrom
1960	in mazut	348	445	314	400+	406++	272	275+	351	Magnohrom
1961	mešano in	318	377++	317	342++	438	255	278	332	Magnohrom
1962	kisik za	268	385	286	298	351	270	236	299	Magnohrom
1963	oksidacijo	346	339	373	380	352	233	374	342	Magnohrom
1964	oksidacijo	478	432	444	368	342	431	375	410	Magnohrom
1965	oksidacijo	421	405	348	386	332	351	390	371	Magnohrom
1966	mazut, zgo- revni in oksi- dacij. kisik	364	249	331	281	302	270	424	312	Magnohrom

Oznake: + — dodatna mazutna kurjava  
 ++ — popolna mazutna kurjava  
 × — izvzeto pri izračunu poprečij zaradi večjih popravil

Podatki<sup>2</sup> se nanašajo na 10 let ter jih je avtor zbral iz razlogov, ker se je vzdržnost slabšala. Vsa leta je podjetje »Magnohrom« izdelovalo rebraste oboke visečega tipa po patentu »Derling«. Od leta 1963 naprej smo prešli na format 5MRS z višino opeke 380 mm. Obok je bil viseč, vendar z enakomerno debelino izdelan iz krommagnezita.

Odvisnost vzdržnosti obokov od načina kurjenja peči prikazuje tabela 3.

leto	delež goriva	
	mazut %	gener. plin %
1958	39,7	60,3
1959	40,0	60,0
1960	46,7	53,3
1961	51,8	48,2
1962	67,9	32,1
1963	70,8	29,2
1964	81,9	18,1
1965	98,9	1,1
1966	100,0	—

Tabela 3 — Spreminjanje goriva

Enako ugotavlja A. Schöberl<sup>3</sup>. 30-tonska SM peč z Radex E opeko je vzdržala poprečno 2600 šarž, ko so jo kurili z generatorskim plinom. V letu 1939 so uporabljali zemeljski plin in mazut ter je bila vzdržnost na 40-tonski peči z Radex E obokom 1149 šarž. Pri isti peči je obok SKI vzdržal 1574 šarž. Vrednosti so dosti večje, ker moramo upoštevati, da so bile izkušnje podjetja »RADEX« mnogo večje kot pa našega domačega podjetja »Magnohrom«.

Napori za povečanje vzdržnosti obokov na Jesenicah so bili najbolj uspešni pri prvih obokih nove vrste. Ugotavljamo, da je bila sprememba od rebrastega na radialni 5MRS obok dobra na večini pečeh, ne pa povsod. Enako je bil prvi trapezasti obok dober, saj je vzdržal 454 šarž, naslednji pa manj.

Način obešanja oboka prikazuje slika 1.



Slika 1

V letu 1966 smo prešli od formata 5MRS na 5MRT, ki ima manjšo debelino opeke. Obenem smo dobili tudi s pločevino oblečeno opeko. Lani smo uporabili nekaj obokov formata PL5MRT (žgana krommagnezitna opeka v pločevini). Prvi obok je vzdržal 393 šarž, drugi pa 453 šarž. Ob ustavitvi peči je bila opeka debela še 22 cm, izjedena bolj le ob zadnji steni. Če ne bi bila že izrabljena zadnja stena, bi oba oboka vzdržala brez vsakega krpanja še 60—80 šarž več.

Način dilatiranja prikazuje slika 2.



Slika 2

Med delom je opeka izpostavljena mnogim kemičnim vplivom, ki ji spremenijo sestavo. Spremembo kemične sestave opeke prikazuje tabela 4.

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	cel. CaO
nova opeka	4,60	7,20	6,59	0,23	25,23	0,74	50,87	2,24
delov. sloj opeke v peči	1,50	4,60	44,07	1,43	13,59	1,55	29,54	3,14

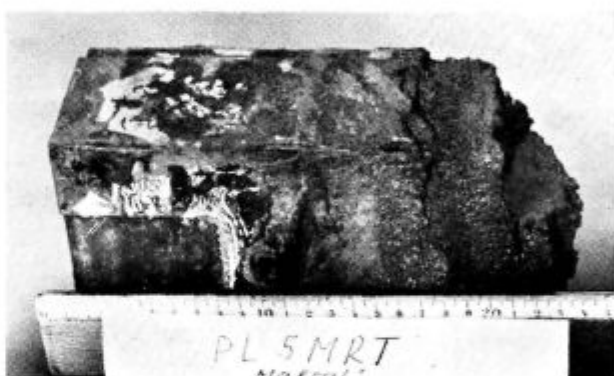
	CaF <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	žarozguba
nova opeka	2,10	0,20	0,10	0,50	0,94
del. sloj opeke v peči	2,22	0,21	0,10	0,70	0,28

Tabela 4 — Sestava dobavljenih in rabljenih opek

Sprememba sestave kaže, da postane delovni sloj opeke siromašen na Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in MgO in da se močno poveča koncentracija oksidov Fe, Ca in Mn. Že dobavljena opeka ima preveč SiO<sub>2</sub>, kar pospešuje tvorjenje silikatne faze in luščenje. Nekaj povečana koncentracija CaO kaže, da so dodatki slabi, predvsem apno, ki ima preveč prahu. Na<sub>2</sub>O verjetno izvira iz plavžarske žilindre, ker grodelj odžvepla s sodo.

Nekatere analize kažejo še večje onečiščenje z dodatki v pečeh pa obogatitve Fe oksidov zaradi kisika: CaO do 8,10, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> do 66% in FeO do 3,4%.

Vsi oboki imajo ob ustavitvi peči odluščen sloj, 3—5 cm oddaljen od delovne površine, če ne pa vsaj razpoko v tej razdalji. Verjetno bi armiranje opeke v notranjosti nekoliko zmanjšalo nagnjenost k luščenju (»spalling«), še bolj pa bi ta pojav zmanjšala sestava opeke z manj SiO<sub>2</sub>. Fotografija rabljene opeke s pojavi luščenja nazorno prikazuje ta pojav (slika 3).



(Slika 3 — 2 opeki na mizi)

Infiltriranje železovih oksidov v delovno površino opeke je večje pri krommagnezitni kot pri magnezitkromitni opeki. Nabrekanje ali »bursting« je izrazit pojav pri opekah z več kromita.

Slika 4 prikazuje obok po 308 šaržah.

Povečanje volumna delovnega sloja opeke je vidno kot nabrekli v neenakomernih oblikah. Vezana opeka V5MRT je izdelana brez pločevine. Po vsej peči je vidno večje luščenje kot pri opeki s pločevino, iz katere je grajen ves obok.

Študija Chestersa (4) obravnava negativne vplive atmosfere v peči. Prah (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO in CaO) se lepi na opeko. Železo je v glavnem v obliki magnetita. To da z obstoječim Cr špinelom trdno raztopino, ki precej poveča volumen. Zaradi tega se tvorijo razpoke, ki so eden glavnih vzrokov porušitve opeke. Raziskave neuporabljenih in uporabljenih krommagnezitivnih opek kažejo precej sprememb:

1. Absorpcija železovih oksidov v kromitnih zrnih, kar povzroča rast zrn (»bursting«).

2. Reakcija Si matice z vstopajočim železovim oksidom. Produkt je fajalit, ki se oblikuje v notranjosti opeke (»spalling«).

3. Absorpcija CaO, ki tvori s sestavinami opeke monticelit ( $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ) nekaj cm za delovno površino opeke.



(Slika 4)

Chesters trdi, da poleg navedenih vzrokov vplivajo na opeko v veliki meri tudi temperaturni skoki in naknadno krčenje, recirkulacija plinov in atmosfera peči.

V krommagnezitni opeki, ki se mineraloško sestoji iz krom špinela, periklasa, forsterita ( $2 \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ ) in monticelita ( $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ ), je apno vedno nezaželeno. Če se lepi preveč apna na opeko, se poveča vsebnost komponent, ki so lahko topne (monticelit in dikalcijev ferit). S tem raste razmerje  $\text{CaO} : \text{SiO}_2$ . Če je to molekularno razmerje manjše od 2, je  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  v špinelu, če pa je večje od 2, je v opeki kot  $\text{CaO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ , vendar le, dokler ni oksidacijske atmosfere. V oksidacijski atmosferi razpade del  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  v  $\text{CrO}_3$ . Ob zadostni količini  $\text{CaO}$  ( $\text{CaO} : \text{SiO}_2 > 2$ ) se na  $\text{CaO}$  veže tudi del ali celo ves  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  in nastane lahko topen dikalcijev ferit, pri razmerju  $< 2$  pa se  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  veže z  $\text{MgO}$  v špinelu.

Rešitev tega problema je v povišanem  $\text{MgO}$  v opeki, to je sestav magnezitkromita, direktno vezana opeka z nizko vsebnostjo  $\text{SiO}_2$ .  $\text{SiO}_2$  naj bi bil vezan v odporen forsterit ( $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ ).

Vzdržnost obokov 45—50-tonske SM peči je bila v lanskem letu različna in je znašala brez krpanja kot prikazuje tabela 5:

obok 5MRS	— 258 šarž
obok 5MRT	— 247 šarž
obok PL5MRT	— 426 šarž

Tabela 5 — Poprečna vzdržnost obokov v l. 1966

G. Mörtl<sup>6</sup> in sodelavci poročajo o različnem gradivu za oboke. Poskusi, ki so jih delali z običajnimi krommagnezitnimi in magnezitkromitnimi opekami v primerjavi s »simultan« sintrom, kažejo prednost zadnjih. Običajna opeka ima zrna sestavin vezana s silikatno fazo. Opeka se žge pri temperaturi do  $1550^\circ$ . Silikatna faza veže na eni strani kromit in periklas, da drugi periklas na periklas, govorimo torej o »silikatni vezavi«.

Keramična vezava periklasa s kromitom, ki jo dosežemo pri visoki temperaturi, imenovana »direktna vezava«, daje najboljše gradivo za opeko. »Bursting« se zmanjša od 4 na 2 ‰. Obraba direktno vezane opeke je znašala na 35-tonski peči 0,21 mm na šaržo, pri običajni magnezitkromitni opeki pa 0,38 mm na šaržo. Na 120 tonski peči je znašala obraba pri običajni opeki 0,40 mm na šaržo, pri direktni vezavi 0,28 mm na šaržo. Pri nas je obraba na šaržo pri doslej najboljši vzdržnosti 0,57 mm na šaržo; ob ustavitvi peči je opeka debela še 12 cm.

Rešitev problema za nas je uporaba opeke v pločevini z notranjo armaturo, z najmanjšo poroznostjo, pri najboljši termostabilnosti in z minimalno vsebnostjo  $\text{SiO}_2$ . Čimprej pa moramo preiti na opeko z »direktno vezavo«. Za podaljšanje vzdržnosti je izredno pomembno brizganje obokov z masami.

#### b) Zadnje stene

Karakteristika plamena ima na obrabo zadnje stene še večji vpliv kot pa na obrabo oboka. Dodatno temu je stena izpostavljena udarcem pri zakladanju vložka in še kemičnim in erozijskim vplivom žilindre, bodisi ob nivoju kopeli ali pri oksidaciji s kisikom. Dimenzija peči, v glavnem razmerje dolžine kopeli proti širini, je zelo pomembno.

Medtem, ko smo v prejšnjih letih, ko so bile peči kurjene z generatorskim plinom, obnavljali obok prej kakor zadnjo steno, se je stanje v zadnjih letih obrnilo. Po 180 — 230 šaržah je zadnja stena potrebna popravila. Odpadanje slojev opeke in luščenje opeke je glavni vzrok remontov. Izbira gradiva, od kemično vezane do magnezitkromita in »belega« magnezita z najmanj 92 ‰  $\text{MgO}$ , ni izboljšalo res kritičnega položaja. Dilatiranje opeke s 4 ‰ na račun kemičnih vplivov ni prineslo izboljšanja. Večji nagib zadnjih sten je pri uporabi mazuta brez kisika močno povečal vzdržnost, ob uporabi kisika pa opeka kljub temu odgori, v kolikor se že prej del stene ne poruši.

A. Schöberl<sup>3</sup> ugotavlja, da je pri kurjenju peči z generatorskim plinom zadnja stena vzdržala 1400 šarž, pri kurjenju z zemeljskim plinom in mazutom pa so z brizganjem stene dosegli manj, to je 1148 šarž. Pri zidanju stene s »SKI« opeko je znašala vzdržnost brez brizganja 1574 šarž.

Premajhna termostabilnost navadnega magnezita in prevelika trdnost povzročata luščenje in odgorevanje opeke. Če smatramo, da je zadnja stena podaljšek oboka, kar je pri MB peči tudi izvedeno, moramo uporabljati nad nivojem kopeli gradivo, ki ima enake fizikalne lastnosti kakor za dober obok. Poskus na peči 7, kjer smo steno zidali iz opeke 5MRT, ni dal zadovoljive rešitve. Opeka je vzdržala 269 šarž. Normalna vzdržnost zadnje stene na isti peči je bila 250 šarž. Na vsak način je nujno treba uskladiti dimenzije opeke za oboke in debelino zadnjih sten tako, da bo obraba obeh delov peči istočasna in ne, da je treba porušiti še dokaj uporaben obok.

Večina jeklarn podaljšuje vzdržnost obokov in zadnjih sten z brizganjem primernih mas. Brizgati je treba po 6—8 šaržah obratovanja in ne šele, ko je obzidava tanka.

Poraba mas je velika.<sup>6</sup> Za obok 185-tonske peči 1,33 kg/t jekla, vendar podaljša življenjsko dobo oboka za 66—100 %. Kadar peč ustavimo, ni mogoče popravljati površine, ampak je potreba popraviti vso peč, tako zgoraj kot spodaj.

Vzorec nasedlin na gredelni opeki je pokazal naslednji sestav (tabela 7):

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	CaO	MgO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	alkal.
nasedline površina	2,84	4,08	71,52	—	4,48	4,16	1,29	11,37
opeke K-3	23,00	19,99	29,12	—	4,48	4,32	1,03	17,16

Tabela 7 — Sestava nasedlin v gredelih

Posebno je viden porast Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO in alkalij, ki izvirajo iz onečiščenja atmosfere v peči. Podobni so pojavi v žilindrih. V žilindrih je gradivo, ki odpade od jaškov in prah iz peči. Sestava je podobna rabljeni opeki iz krommagnezita (tabela 8):

SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	alkalije
2,60	49,09	11,28	7,17	19,96	0,12

Tabela 8 — Sestava žindre v žilindriku

Ze nekaj let uporabljajo po svetu bazično gredelno opeko. A. Schöberl<sup>3</sup> opisuje gredele 40-tonske peči, ki ima 13 vrst EGT opeke (magnezitkromit) in spodaj 16 vrst šamotne opeke z odpornostjo proti ognju SK 34. Vzdržnost gredelov z vmesnim čiščenjem znaša 3000 šarž.

Brizganje zadnjih sten opisuje B. A. Velikij.<sup>7</sup> Na 500-tonske peči je stena vzdržala prej do 135 šarž, z brizganjem do 680 šarž. Potreba po takem delu je več kot upravičena.

Poraba magnezitne opeke, ki jo vgrajujemo v zadnje stene in v del stebričev je bila pri nas (tabela 6):

v letu 1963	— 4,96 kg/t jekla
v letu 1964	— 4,84 kg/t jekla
v letu 1965	— 5,42 kg/t jekla
v letu 1966	— 9,50 kg/t jekla

Tabela 6 — Poraba opeke za stene in stebriče

### c) Bazična opeka v komorah

Normalno smo pri uporabi generatorskega plina menjavali gredele v komorah ob remontu oboka. Pri pečeh, ki imajo majhne komore in slabo razdelitev odvodnih plinov tudi na nekdanje plinske komore, je potrebno to ob remontu zadnje stene ali pri 180 — 230 šaržah. Samotna opeka s SK 31/32 ni več dovolj odporna proti ognju ob kurjenju z mazutom, še posebno pa ne ob uporabi kisika. Prah, ki se vseda v odprtine gredelov ima zelo podobno sestavo kot v tabeli 4, le da nima MgO in Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ampak do 71,5 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Ta prah reagira s šamotno opeko in jo raztali. Nataljena gmota steče navzdol po jaških gredelov in jih začepi.

Ž. A. Vidrina in A. P. Ključenov<sup>8</sup> poročata o obsežnih poskusih za primerno gradivo v komorah. Visokoglinična opeka se je natalila s prahom v debelini 8—25 mm. Forsteritna opeka se je dobro obnesla, ima pa slab koeficient toplotne prevodnosti (pri 1200° — 0,8 kcal/m, °C, h, šamot pri 1200° — 1,14 do 1,47 kcal/m, °C, h).

Najbolje se je obnesel magnezitkromit (koeficient toplotne prevodnosti je pri 1200° — 2,71 kcal/m, °C, h). V članku so opisani poskusi in meritve za razne vrste opeke.

Obsežni poskusi na Jesenicah so pokazali prednost forsteritnih in magnezitkromitnih gredelnih opek. V večje in forsirano delujoče peči smo dali od 8 — 14 vrst opek.

Poskusi z »belim« magnezitom so dali boljše rezultate kakor pa šamot. Pravilno je, da položimo na magnezitne opeke po 2 vrsti šamotnih opek, ki prevzamejo nase toplotne udrce. Po ustavitvi peči je bila ta šamotna opeka izlizana, magne-

zitna pa ne toliko razpokana, da ne bi bila več uporabna. Komore brez šamota na vrhu so imele opeko razcvetenno.

Na peči 3 smo preizkusili doma izdelan forsterit z naslednjimi lastnostmi (tabela 9):

Ta	trdnost	SK	teža/kom.
1510	230	33	7,7

Tabela 9 — Fizikalne lastnosti domačega forsterita

Ta	trdnost	spec. teža	vol. teža	poroz.	vpij. vode	temp. sp.
1700	472—602	3,40—3,42	2,62—2,69	21,8	8,1—8,3	1—2 krat

Tabela 10 — Fizikalne lastnosti forsteritne opeke iz »Mahnroma«

Korundna opeka proizvedena v Gostivaru je bila v komorah peči 4. Po 201 šarži so bile komore popolnoma nataljene in preseki začepjeni. Opeka je imela 60 in 80 %  $Al_2O_3$ .



(Slika 5)

Opeka sama je bila izdelana nepravilno. Večja zrna korunda so bila vezana s proti ognju odporno glino. Med obratovanjem se je glina natalila in zrna korunda so izpadla. Vložiti zrna z visoko odpornostjo proti ognju v slabo vezavo nima nobene vrednosti. Verjetno je vmes še kemični vpliv prahu in  $Al_2O_3$ , ki tvori spojine z nižjim tališčem. Po 201 šarži je bila opeka odtaljena na 40 % debeline, stvorjena žindra pa je zalila prehode pod gredeli.

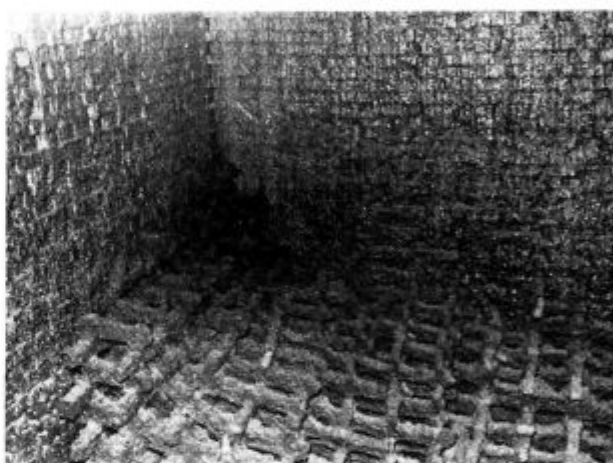
Iz silke 7 je razvidno odtaljevanje korunda. Opeka take vrste je neuporabna za gredole.

Poleg slabe vzdržljivosti je izredno visoka cena glavna ovira za uporabnost take opeke.

Po 264 šaržah je bila opeka začepljena s prahom, ne pa posedena. Peč je izdelala še 297 šarž. Po ustavitvi so bile komore zelo nataljene. Dejstvo pa je, da je peč vso kampanjo zelo dobro obratovala ter so se komore posedle šele zadnjih nekaj dni. Skupna vzdržnost 561 šarž je na tej peči doslej največja.

Pod enakimi pogoji je bil v drugi komori magnezitkromit in je vzdržal enako kakor forsterit.

Forsterit proizveden v »Mahnromu« je še sedaj na peči I in je bil ob ustavitvi peči popolnoma nenataljen, le preseki so bili začepljeni s prahom. Po odstranitvi zgornjega sloja opeke peč še obratuje. Lastnosti tega forsterita so bile (tabela 10):



(Slika 6)



(Slika 7) — Preseki korundnih opek

Pokazatelj vzdržnosti gredel je poraba opeke. Samo šamota smo porabili lani (tabela 11):

- v letu 1963 — 7,99 kg/t jekla
- v letu 1964 — 5,85 kg/t jekla
- v letu 1965 — 7,30 kg/t jekla
- v letu 1966 — 6,53 kg/t jekla

Tabela 11 — Poraba šamotne gredelne opeke

Lani smo delno že imeli forsteritno in magnezitkromitno opeko. Porabo le-te prikazujemo pod krommagnezitom in je zato porabljeno še manj šamotne opeke.

### Zaključki

Domači poskusi in inozemske izkušnje kažejo, da je nujno treba uporabljati za oboke armirano in s pločevino obloženo opeko. Sestava se mora približevati magnezitkromitu, zrna sestavin morajo biti direktno vezana.

Za zadnje stene je potrebno še preizkusiti s pločevino obložen magnezit. Fizikalne lastnosti ma-

gnezita morajo izkazovati predvsem boljšo termostabilnost, manj primesi in več MgO. Še boljše je armirana opeka.

Pri forsiranem delu peči ne moremo uporabljati že preživele šamotne opeke, ampak v izpostavljenem delu kamor le forsterit ali magnezitkromit. Ugotoviti pa je treba vpliv slabše toplotne prevodnosti forsterita proti magnezitu. Korundna opeka za gredele v taki izvedbi kot smo jo dobili, je neuporabna. Nujno bi bilo treba preizkusiti boksitno opeko za gredele. Nasprotno pa bo korundna opeka verjetno za viseče jaške zelo dobra. Poskusi so v teku na Jesenicah.

<sup>1</sup> — The british Steelmaker — december 1966

<sup>2</sup> — Inž. A. Prešeren — Poročilo o vzdržnosti obokov, 1962

<sup>3</sup> — A. Schöbel in E. Pink — Radex Rundschau, zvezek 4, 1965

<sup>4</sup> — Chesters: Steelplant Refractories — 1965

<sup>5</sup> — G. Mörtl, N. Skalla, A. Winkler, W. Zednicek — Redex Rundschau, zvezek 4 — 1965

<sup>6</sup> — F. C. Muttitt, G. A. Nanne — Journal of Metals, junij 1965

<sup>7</sup> — B. A. Velikij — Stalj, zvezek 11 — 1966

<sup>8</sup> — Z. A. Vidrina in A. P. Ključerov — Stalj 1965, stran 522 do 528.



## Povečanje vdržnosti glavnega oboka SM peči v železarni Štore

S forsirano proizvodnjo jekla se je vzdržnost glavnih obokov SM peči bistveno poslabšala in predstavlja v naših jeklarnah problem.

Izvršenih je bilo več raziskav in poizkusov. Pri nas smo z uvedbo sistematičnega in intenzivnega popuščanja uspeli povečati vzdržnost glavnega oboka za 35 odstotkov.

Po letu 1963 se je s forsirano proizvodnjo jekla vzdržnost SM peči v železarni Štore bistveno poslabšala. Enak problem je nastopil tudi v drugih železarnah.

Nastale spremembe v tehnologiji obratovanja SM peči (vedno večja toplotna obremenitev, uporaba metalurškega kisika) so vsekakor močno vplivale na vzdržnost peči. Predvsem pri agregatih z zastarelo konstrukcijo.

Metalurški inštitut v Ljubljani že več kot 6 let redno vrši preiskave ognja vzdržnega materiala in zasleduje vzdržnost SM peči. V tem času je bilo ugotovljeno, da je vzdržnost SM peči po železarnah nekoliko različna in da je kvaliteta ognja vzdržnega materiala v glavnem enaka razen, da je bilo zaslediti poslabšanje magnezitnega materiala v zadnjih treh letih. Karakteristika magnezitne opeke se je močno spremenila. Zelo se je dvignila mehanska trdnost v hladnem, padla pa je točka zmehčiča, oziroma porušitve opeke v vročem stanju. Ker je magnezitna opeka vgrajena v zadnjih stenah in stebričkih, se je poslabšanje kvalitete odrazilo ne teh delih peči.

Vzporedno pa je kvaliteta krommagnezitnega materiala ostala na isti ravni, brez bistvenih sprememb.

Ker je bila za navedeno obdobje vzdržnost SM peči odvisna predvsem od vzdržnosti glavnega oboka, obok pa je postajal vedno bolj kritičen, so brez dvoma zahtevnejši pogoji tehnologije vplivali na poslabšanje.

Problem vzdržnosti glavnega oboka se je pojavil skoraj istočasno v vseh naših železarnah in že nekoliko prej v bolj razvitih industrijskih deželah. Da bi povečali vzdržnost glavnega oboka in s tem vzdržnost SM peči, so drugje v svetu, predvsem v SSSR, izboljšali kvaliteto ognja vzdržnega materiala z uvedbo kromspinelne opeke, ki je žgana pri temperaturi 1680° C; pri nas pa je krommagnezitna opeka žgana pri temperaturi 1550 do 1600° C.

Slaba vzdržnost glavnega oboka se je odražala v luščenju opeke v plasteh po celi površini oboka. Obok se je pričel luščiti že po nekaj šaržah. Tako je do petdesete šarže odpadla prva plast v debelini 50—60 mm. Še predno je prva plast v celoti odpadla, se je pokazala že druga, ki je bila neko-

liko tanjša. Druga plast je odpadla že do stote šarže. Obok je hitro propadel. Po 190 šaržah je bil obok (polje) dotrajan. Nato smo polje prekrili s 4 SP opeko za krpanje tako, da smo polje z višino reber izenačili. Tako je obok vzdržal še 150 šarž. Poprečna vzdržnost glavnega oboka je za našo peč znašala v letu 1963 in 1964 347 šarž.

V navedenem obdobju je bil obok SM peči standardno urejen s potrebnimi dilatacijami po navodilih »Vatrostalne« — Zenica in »Magnohroma« — Kraljevo. Ogrevanje peči smo vršili po predpisanih diagramih od 100—140 ur, odvisno od obsega remonta. Ogrevanje peči po remontu je bilo časovno kot toplotno vsklajeno po standardnih metodah s popuščanjem oboka na sidrih. Veljalo je staro pravilo, da se obok pri segrevanju nekoliko dvigne (do + 20 mm) in nato obdrži na isti višini preko vse kampanje peči.

Luščenje oboka se je pri nas pojavilo že leta 1962, vendar ne v takem obsegu kot v letih 1963 in 1964. Že leta 1962 je Metalurški inštitut v Ljubljani pričel raziskovati vzroke luščenja oboka, predvsem z ozirom na kvaliteto opeke. S pomočjo angleške litaretur »Refractories« — Norton in lastnih raziskav je MI obrazložil glavni vzrok luščenja oboka, kot sledi:

»Pri uporabi opeke v obokih se pojavljajo napetostne razpoke, ki povzročajo lomljenje oglov opeke na strani, ki je izpostavljena vročini. Prav tako nastajajo po dolžini vertikalne razpoke. Te razpoke gredo tem globlje, čim debelejša je opeka in čim hitreje jo ogrevamo, ker tedaj nastopajo večje natezne napetosti. Opeka je zaradi teh razpok izpostavljena hitrejši obrabi. V razpoke prodirajo pare, prah in razne taline, kar opeko razžene in tudi kemijsko uniči. Poleg teh razpok se pri opekah, ki vsebujejo silikate ustvari za »licem« opeke steklasta cona, ki je v odvisnosti od sestave in tališča steklaste faze in v odvisnosti od temperature, nižje ali dalje od lica opeke. Ta cona sega tudi do 60 mm globoko. Tam, kjer se ta faza pojavi, se trdnost opeke občutno zmanjša in se tako vgrajene opeke v oboku odluščijo prav na tem mestu, po večjih površinah.«

»Steklasto fazo v opeki tvorijo pretežno primesi kot so SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, tekočo fazo pa razni silikati kalcija, magnezija in alumi-

nija. Tekoča faza se pojavlja že pri 1335° C, ko se ustvarja mineral grosular ( $3 \text{ CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3 \times 5 \text{ SiO}_2$ ), pri tem je treba še upoštevati železove silikate in več komponentne spojine, ki imajo še nižje tališče in nizko viskoznost. Tekoča faza se v opeki ustvarja na mestu, ki je ogreto na 1350—1450° C. Iz lica opeke staljene komponente migrirajo deloma proti hladnejšemu delu opeke, deloma pa se izcejajo in prevlečejo površino opeke, ki se počasi stali. Tekoča faza iz hladnejših delov opeke tudi migrira navzdol in se tako na določenem mestu zbere kritična količina viskozne taline, ki povzroči pri določeni temperaturi odpadanje opeke.

V bazični opeki se nahaja od 4—6%  $\text{SiO}_2$ , ki tvori z  $\text{MgO}$  forsterit ali klinoenstatit, oba pa sta občutljiva na hitre temperaturne spremembe in slednji tudi ni ognja vzdržen (tališče 1557° C). Glinice je v opeki 14—20%, ki tvori z  $\text{MgO}$  spinel in ta je odporen na termošoke ter ima nizko ognja vzdržnost. Nastopajo pa tudi bolj komplicirani minerali, vendar se smatra, da je pri bazičnih opekah glavna vezava na bazi  $\text{MgO}$  preko »forsterita ( $2 \text{ MgO} \times \text{SiO}_2$ , tališče 1890° C)«.

Po navedeni razlagi je MI predlagal za preprečitev takih pojavov opeke z veliko trdnostjo in gostoto ter zmerno odpornostjo proti termičnim šokom in visokim zmeščičem pod obremenitvijo. Navedeni pogoji zahtevajo opeko brez spojin z nizkim tališčem, ki bi ustvarile steklasto cono za vročim licem opeke. Velika gostota opeke pa zagotavlja njeno odpornost proti prodiranju nečistoč iz atmosfere peči v opeko. Visoka mehanska trdnost opeke pa povzroči, da ta ne razpade zaradi notranjih napetosti pri ogrevanju. Take zahteve v industrijsko razvitih državah postavljajo potrošniki, npr. General Refractories: trdnost 350 do 400  $\text{kg/cm}^2$ , zmeščiče pod obremenitvijo 1610 do 1740° C, poroznost manjša kot 22% in termični šok + 30. Po JUS pa je predpisana minimalna trdnost 150  $\text{kg/cm}^2$ , po katalogu Magnohroma pa 250—600  $\text{kg/cm}^2$ . Magnohrom nam je sicer v letu 1962 dobavljal krommagnezitno opeko z 220 do 319  $\text{kg/cm}^2$  trdnosti, ter poroznostjo pod 22%.

Tako je bila v letu 1962 problematika usmerjena predvsem na kvaliteto opeke. Magnohrom je v letu 1963 in 1964 nekoliko izboljšal kvaliteto krommagnezitne opeke za oboke, vendar je vzdržnost glavnih obokov SM peči v vseh železarnah ostala kritična.

V letu 1963 se je problematika vzdržnosti obokov usmerila, oziroma omejila na konstrukcijo obokov (kot je razvidno iz poročila MI »Centralna kontrola ognja vzdržnega materiala za leto 1963«), kot sledi:

— presek formata krommagnezitne opeke za obok SM peči ni v skladu s teorijo elastičnosti in notranjih napetosti kot posledica toplotnega širjenja in krčenja v SM pečeh pri toplotnem režimu. Format, ki se uporablja v naših železarnah, bi moral biti 2—3-krat manjši,

— format krommagnezitnih opek za oboke SM peči ne odgovarja oznakam formata in izračunanim vrednostim z ozirom na razpetino in radius oboka. Posledice so v tem, da se mora opeka prilagoditi v nedovoljeni meri s sekanjem ali pa s spreminjanjem oblike in višine oboka. Tako se poveča mehanska obremenitev opek pri segrevanju SM peči, posebno v času, ko se vršijo mineraloške spremembe, katere močno vplivajo na termične šoke, mehansko odpornost in kemijsko korozijo,

— poizkusi so tudi pokazali, da luščenje obokov v tanjših plasteh povzročajo kemijske spremembe materiala pod vplivom temperaturnih sprememb, kar je normalno. Odpadanje debelejših plasti do približno 50 mm in na večjih površinah (pri 80—100 šarž in navzgor) pa povzročajo mehanske sile.

Na podlagi teh ugotovitev so se vršili razni poizkusi, predvsem v Železarni Jesenice. Spremenili so konstrukcijo oboka in konstrukcijo opeke (format 5 MRS, Steelclad v obliki trapeza in prizme). Zasedovali so tudi način zidave obokov in uvedli različne metode tako po načinu dilatacije kot na celotno velikost dilatacije. Izvedeni poizkusi pa niso pokazali bistvenega izboljšanja. Pri vseh teh poizkusih so opazovali obnašanje opeke različnih formatov, dilatacije, konstrukcijo oboka, vpliv temperature v peči in proizvodnega programa ter prišli do zaključkov, da ležijo vzroki slabe vzdržnosti predvsem v tem da:

— konstrukcija formata opeke ne odgovarja predvidenemu polmeru. Opeka je v spodnjih plasteh bolj obremenjena in se zaradi velikih bočnih pritiskov lušči po slojih,

— izdelane dilatacijske reže so premajhne in obok na koncu kampanije reži, ter se dvigne za več kot 10 mm,

— standardni formati so preveliki,

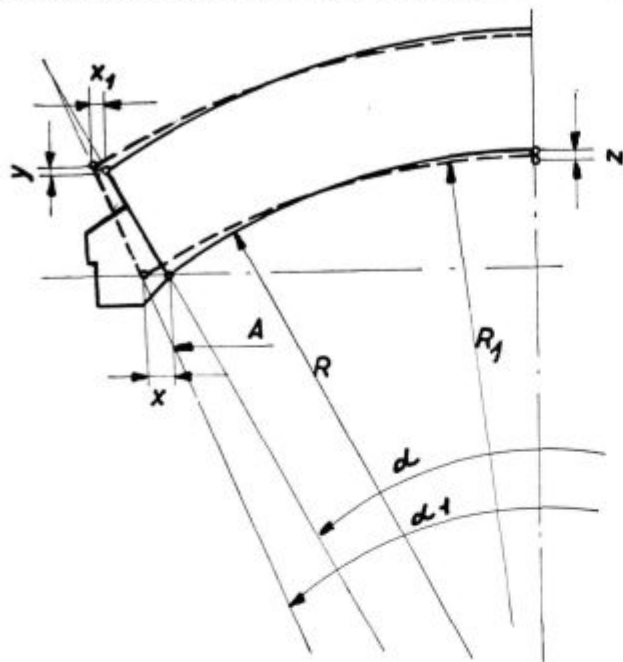
— pri uporabi kisika opeka hitreje razpada,

— poleg kvalitete opeke je zelo važen faktor preobremenjevanje peči z vložkom in povišanjem dna peči, ki zmanjšujeta višino med vložkom in obokom, kar zelo slabo vpliva na vzdržnost oboka.

Do podobnih zaključkov smo prišli tudi pri nas, le da smo se v letu 1963 ukvarjali predvsem s kvaliteto opeke. Boljša kvaliteta opeke za obok pa za naše razmere ni bila dosegljiva. Zato smo posvetili vso pozornost delovanju sil v glavnem oboku.

Že tradicionalno luščenje oboka v plasteh do 60 mm debeline nas je opozarjalo na napetosti v glavnem oboku (preobremenitev opeke na delovni strani oboka, kjer je opeka izpostavljena kemijskim spremembam pod vplivom visokih temperatur in kjer je trdnost opeke najmanjša). Tako smo najprej teoretično določili kako se spreminja oblika oboka — gibanje oboka pri ogrevanju na delovno temperaturo, seveda z upoštevanjem danih pogojev konstrukcije peči — oboka, konstrukcije formata opeke in izmerjenih temperatur na oboku. Upoštevali smo obok kot prosti obočni nosilec, ki je sestavljen iz dveh različnih nosilcev (rebra, polje).

Iz slike št. 1 je razvidno, da se obok pri ogrevanju na delovno temperaturo razširi prečno — spodaj za »x« in zgoraj za »x<sub>1</sub>« in da se na obeh koncih dvigne za »y«, na sredini pa pade za »z«. Spremeni se tudi naklonski kot »α« in polmer oboka R. Naklonski kot ležaja oboka se zmanjša na »α<sub>1</sub>«,



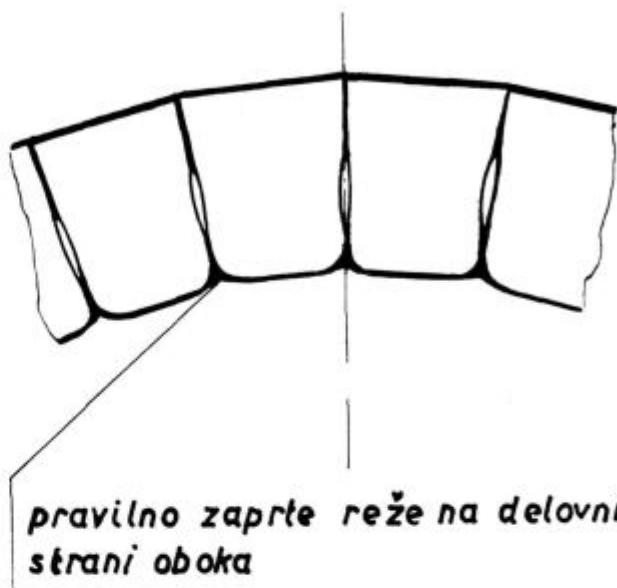
$\alpha$  = kot, ki je odvisen od konstrukcije opeke in oboka

$\alpha_1$  = navidezni kot, ki nastane z ogrevanjem oboka na delovno temperaturo

Sl. 1

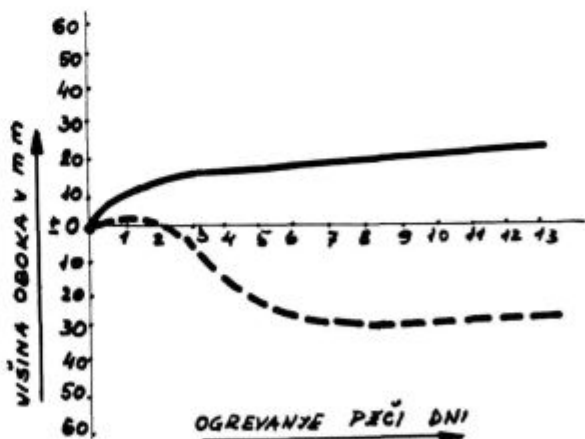
polmer pa se poveča na R<sub>1</sub>. Najvažnejše pri tem je padec oboka in prečno širjenje spodaj, ter sprememba naklonskega kota. Pri računanju smo morali upoštevati konstrukcijo opeke, ki je za rebra drugačna kot za polje. Ker so rebra trajnejši nosilec oboka, smo vzeli za osnovo rebra, polje pa smo prilagodili s sekanjem veznika na isti polmer in naklon. Zaradi tega je postalo polje nekoliko stopničasto, kar tudi slabo vpliva na vzdržnost. Prednji ležaj oboka smo s sekanjem prilagodili odgovarjajočemu naklonskemu kotu »α<sub>1</sub>«, zadnji ležaj oboka pa smo z vijaki naklonili tako, da smo že pri montaži dosegli na notranji strani male reže in tako razbremenili opeko na delovni strani oboka. To velja predvsem za rebra, dočim se polje prilagodi rebrom in se nekoliko posede (zaradi različne konstrukcije opeke). Na ta način prevzamejo rebra bočne sile v zunanjih hladnejših plasteh, kjer je trdnost opeke večja, polje pa je le rahlo vpeto na ležaj oboka in s trenjem vezano na rebra (po vzdolžni smeri oboka).

Pri ogrevanju se opeka na delovni strani oboka najbolj širi. Praktično je najlažje slediti zahtevam širjenja oz. popuščanja preko vzmeti, ki so na sidrih. Popuščanje ni odvisno samo od specifičnega raztezka materiala, pač pa v glavnem od konstrukcije oboka, ki mora biti v hladnem ali v vročem taka, da se prenašajo bočne sile po zunanjih plasteh, na delovni strani pa morajo nastopati male reže (slika št. 2). Poleg pravilne konstrukcije obo-



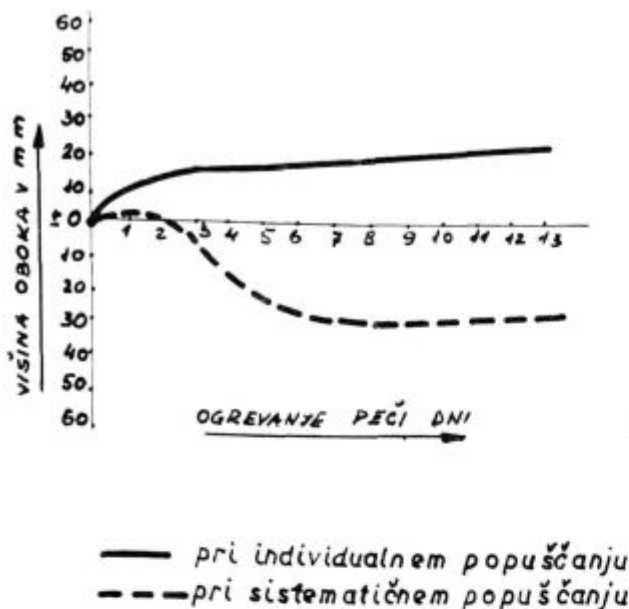
Sl. 2

ka je najvažnejše še pravilno in sistematično popuščanje oboka na sidrih, ter zadnjega ležaja oboka z vijaki (slika št. 3, 5 in 6).

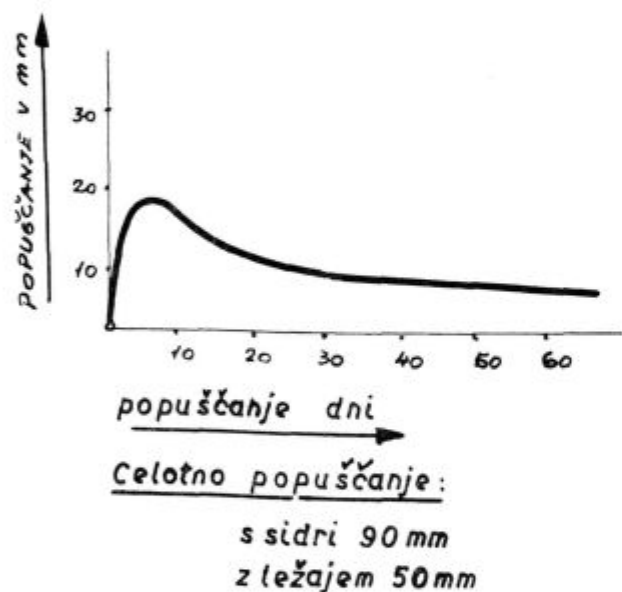


— pri individualnem popuščanju  
 - - - pri sistematičnem popuščanju

Sl. 3



Sl. 4



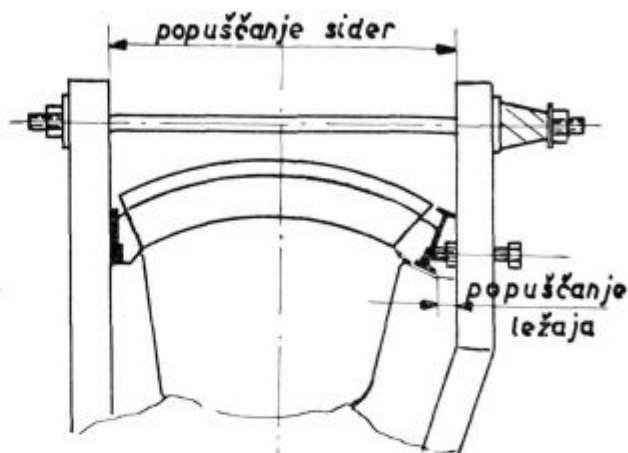
Sl. 5

Ker se stanje oboka spreminja in širjenje raste po vedno večjem loku, je potrebno popuščanje vse dokler obok ne dotraja. Dobljene teoretične vrednosti veljajo le za začetno stanje, tj. do ogrevanja peči na delovno temperaturo, ko je obok še nepoškodovan. Z odgorevanjem ali propadanjem oboka se spreminjajo določene vrednosti, vendar je jasno, da se prečno širjenje večja in da se dalje vrši po že navedenem principu.

Na podlagi opazovanja in meritev, ki smo jih izvršili, sklepamo, da je zaradi anomalij (tolerance v izmerah opeke, nehomogena kvaliteta opeke, odstopanje šablone pri montaži, odstopanje razpetine na ležajih oboka — skica št. 1 oznaka A, slaba montaža oboka, neenakomerno ogrevanje oboka, različne temperature, vpliv trenja — vzdolžno, vpliv sosednje ležajne opeke, skratka vpliv neena-

komernih bočnih pritiskov) praktično potrebno še dodatno popuščanje (teoretično dobljena vrednost + 20 %).

Najpomembnejše praktično merilo pri zasledovanju delovanja oboka je gibanje oboka navzdol ali navgor. Gibanje oboka lahko reguliramo z bočnimi silami, tj. vzmetmi na sidrih. Začetno stanje bočnih sil mora biti takšno, da se po snetu opaža obok ne deformira. Važno je dejstvo, da višina oboka pri ogrevanju pade (slika št. 4), to pa le pod



Sl. 6

pogojem, da je popuščanje pravilno in dovolj veliko (slika št. 6). Začetne minimalne in maksimalne bočne sile je mogoče določiti tudi po trdnostnem preračunu s statično metodo, kjer je treba upoštevati dovoljeno maksimalno tlačno obremenitev opeke (na zunanjem robu do 2 Kp/cm<sup>2</sup>).

Zelo važno je torej zategovanje oboka — oziroma začetno stanje bočnih sil pri snetu opaža, kar se odraža pri ogrevanju peči na delovno temperaturo, ko je širjenje materiala najintenzivnejše.

Iz navedenih podatkov je razvidno, da je bila vzdržnost SM peči še v letu 1964 pretežno odvisna od vzdržnosti glavnega oboka. Po letu 1964, ko smo uspeli povečati vzdržnost glavnega oboka s sistematičnim in intenzivnim popuščanjem na sidrih, pa se je pojavila kritična vzdržnost zadnje stene.

V letu 1965 smo naklonili zadnjo steno za 20°. Sedaj je vzdržnost zadnje stene in oboka izenačena. Pojavlja pa se novi problem — vzdržnost stebričkov in kapelic, ter jaškov, kakor tudi zamašitev jaškov, žlindrenikov in komor.

#### Zaključek

Po letu 1963 se je s forsirano proizvodnjo jekla vzdržnost SM peči (obokov) bistveno poslabšala pri nas, kakor tudi v jugoslovanskem merilu. Predvidena rešitev problema je bila v izboljšanju kvalitete ognja vzdržnega materiala. Kvaliteta opeke za oboke se še do danes ni bistveno izboljšala ter je zaradi tega bilo treba iskati druge rešitve.

V okviru naših možnosti ni bilo mogoče uporabiti boljše kvalitete opeke za obok. Pričeli smo iskati rešitev v vplivu konstrukcije opeke in oboka, ter v delovanju napetosti, ki nastopajo v oboku pri toplotni obremenitvi. Napetosti smo zasledovali z vgrajenimi polžastimi vzmetmi, ki smo jih izkoristili kot dinamometer.

Izdelali smo teoretični princip gibanja oboka z upoštevanjem temperaturnih pogojev in vzporedno zasledovali gibanje oboka pri sistematičnem in intenzivnem popuščanju.

V času remonta od 13. 9. 1964 do 26. 9. 1964 pa smo prilagodili konstrukcijo oboka teoretičnim potrebam in izvedli intenzivno ter sistematično popuščanje. Bistvena razlika je v tem, da smo praktično kot teoretično prišli do zaključka, da se mora držati obok preko vse kampanje pod začetno višino tako, da so napetosti v oboku skoncentrirane v zunanjih plasteh opeke, kjer je trdnost opeke največja.

Tako smo dosegli večjo vzdržnost oboka in s tem peči, ki se je povprečno povečala za 107 šarž na kampanjo peči. V letu 1963 smo imeli vzdržnost 342 šarž, v letu 1964 386 šarž in v letu 1965 že 465 šarž.

Idealno delovanje pritiskov pa bi dosegli s tem, da bi obok popolnoma ločili od ostale konstrukcije peči in istočasno mehanizirali regulacijo naklonskega kota oziroma kota obeh ležajev oboka, kar še predvidevamo v okviru naših tehničnih možnosti.

Navedena rešitev problema je za nas kakor za naše železarne seveda le delna, potrebno bo izboljšati tudi kvaliteto ognja vzdržnega materiala. V zadnjem času kaže »Magnohrom« veliko razumevanje in zanimanje, tako da lahko že v prihodnjem letu pričakujemo izboljšane oz. nove kvalitete ognja vzdržnega materiala za jeklarske peči.

#### Literatura

1. Dr. ing. Jože Muster, POROČILA METALURŠKEGA INSTITUTA V LJUBLJANI  
Centralna kontrola ognjevarnega materiala za leto 1963 in 1964
2. O. Pavlík, I. Brabník, J. Kral, VZKG Ostrava, POVEČANJE TRAJNOSTI RAZLIČNIH MARTINSKIH STROPOV PRI KURJENJU Z MAZUTOM IN PRI UPORABI KISIKA  
Hutnik, št. 4, leto 1963

## Vpliv preddezoksidacije nelegiranega jekla z ogljikom 0,12 do 0,2 na vsebnost oksidnih vključkov

Na osnovi obratovalnih parametrov, kot jih daje tehnološka praksa in rezultatov kemijskih raziskav 18 šarž, izdelanih v jeseniški martinarni, smo študirali vpliv količine dodanih preddezoksidantov in časa po dodatku na znižanje vsebnosti kisika v izdelanem jeklu. S praktično uporabnimi obrazci smo določili medsebojne odvisnosti med tehnologijo in potrebnim obsegom pred- in končne dezoksidacije. Tako dobljeni rezultati omogočajo sestavo optimalnih tehnoloških smernic.

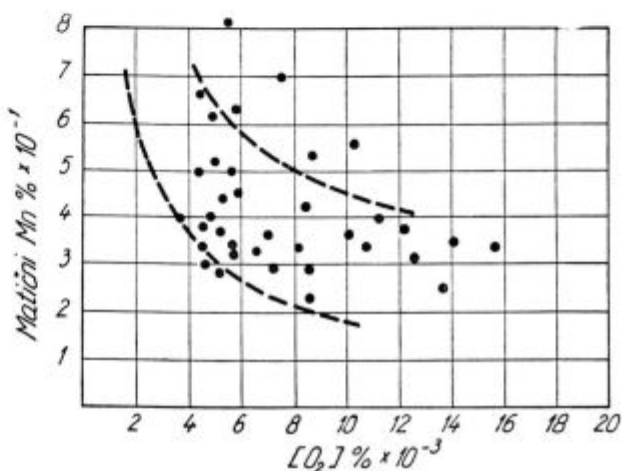
### Uvod

Spričo tesne povezave metalurških reakcij pri dezoksidaciji tekočega jekla z značajem oksidnih vključkov v izdelanem jeklu, je utemeljena zahteva, da mora jeklar izbrati tak način dezoksidiranja, po katerem ne bo le čim manj vključkov, ampak da bodo imeli vključki določeno kemijsko sestavo.

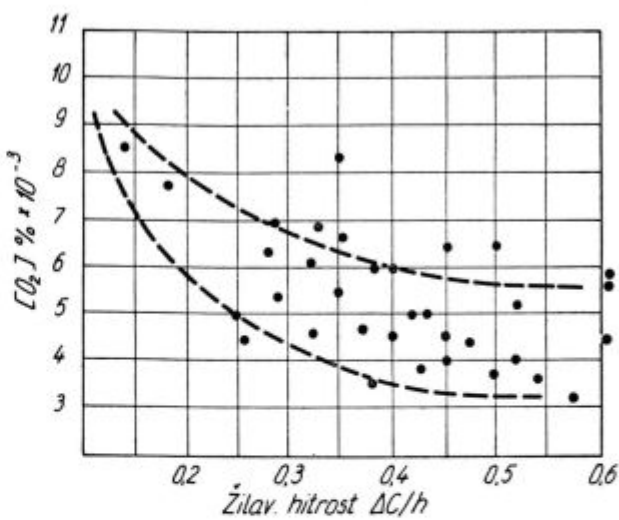
Praktična analiza vpliva nekega načina dezoksidiranja je možna samo tedaj, ko poznamo vsaj v glavnem komponente, ki narekujejo potrebo in obseg dezoksidacije. Skoraj pri vseh proizvodnih postopkih za izdelavo jekla dobimo ob koncu izdelavnega postopka v talini povečan kisik, ki ga odstranjujemo pri masovnih jeklih s pred- in končno dezoksidacijo. V dezoksidacijski fazi prehaja kisik v netopne spojine, ki se morejo izločiti iz taline.

Znan kisik nam praktično omogoča določitev količine potrebnih dezoksidantov, s katerimi moremo vezati prosti kisik do prav majhnih koncentracij; za izločanje dezoksidacijskih produktov pa sta odločilna le temperatura taline in kemijska sestava oksidnih komponent. Tudi če uporabimo najučinkovitejše dezoksidante, utegne biti kisik v jeklu zelo povečan, ako ni mogoče izločiti oksidnih komponent. V splošnem je praktično dognano, da je obseg dezoksidacije v veliki meri odvisen od vodenja rafinacije. Hitrost žilavenja kot funkcija proste količine kisika je v tej fazi tehnološkega postopka zelo pomembna. Konkretno ugotavljamo, da vpliva npr. povečana vsebnost matičnega mangana na zmanjšanje kisika, da bo pri manjši poprečni žilavilni hitrosti vsebnost kisika večja, da pa povečanje žilavilne hitrosti v zadnjih 25–30 minutah rafinacije povečuje kisik v talini. Na slikah 1, 2 in 3 ponazorujemo navedena razmerja za nelegirana jekla 0,12 do 0,45 % ogljika. Medtem ko povečanje poprečne žilavilne hitrosti nad določene vrednosti praktično ne vpliva na zmanjšanje proste količine kisika v talini, utegne znižanje hitrosti pod določeno vrednost znatno zvečati količino kisika.

Z močnimi dezoksidanti lahko vplivamo na zmanjšanje količine kisika. Pri izdelavi nelegiranih jekel je aluminij najbolj znani dezoksidant, ki je



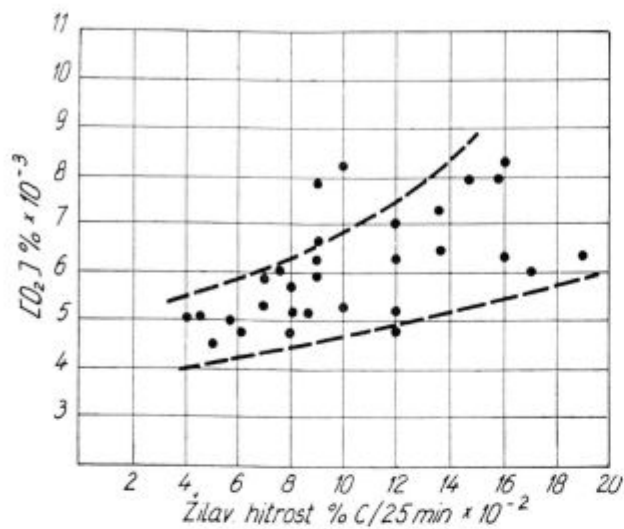
Sl. 1



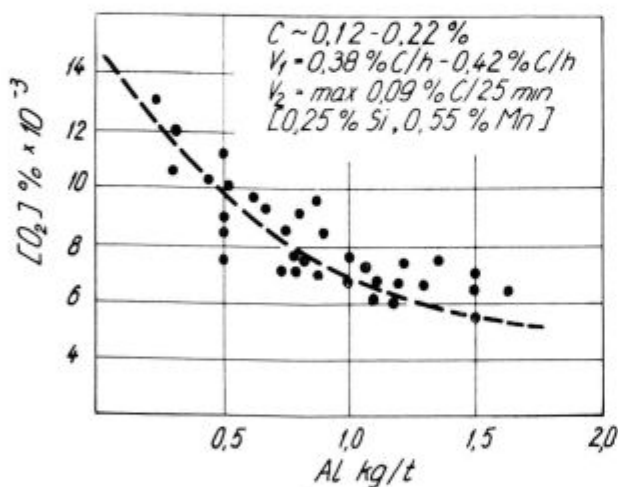
Sl. 2

že pri majhnih količinah v ravnotežju s praktično najmanjšimi količinami kisika. Na sliki 4 ponazorujemo vpliv dodatka aluminija na vsebnost skupnega kisika v izdelanem jeklu z 0,12 do 0,22 %

ogljika. Tudi po prikazanih razmerjih moremo ugotoviti, da je za konkretno kvaliteto določena praktično maksimalna količina dodatka aluminija, nad katero se količina kisika ne spreminja več bistveno.



Sl. 3



Sl. 4

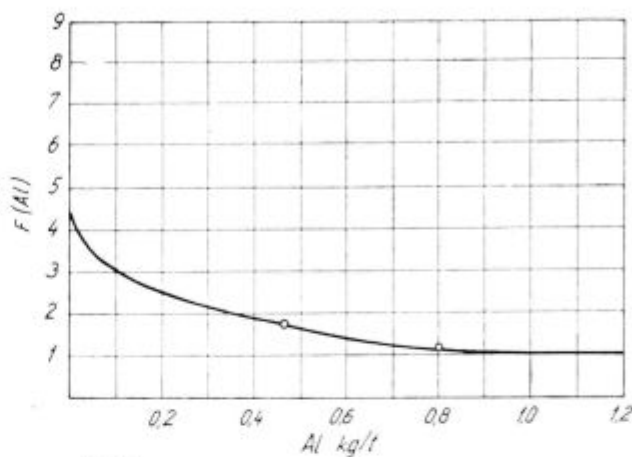
Na podlagi navedenega ima jeklar na voljo (po leg bazicitete žilindre in temperature) zlasti tri praktične faktorje, od katerih je odvisno, ali bo v izdelanem jeklu več ali manj kisika.

Statistično zasledovanje vpliva žilavilnih hitrosti in učinkovitega dodatka aluminija na vsebnost kisika v izdelanem jeklu pri številnih nizko in srednje ogljičnih nelegiranih jeklih, brez predzooksidacije, omogoča sestavo praktičnega obrazca za kalkulacijo vsebnosti skupne količine kisika kot sledi:

$$O_2 = \frac{F(Al)}{C_2} \times \frac{0,5 \times K_1}{V_1} \times \frac{V_2}{K_2} \times 10^{-3} \%$$

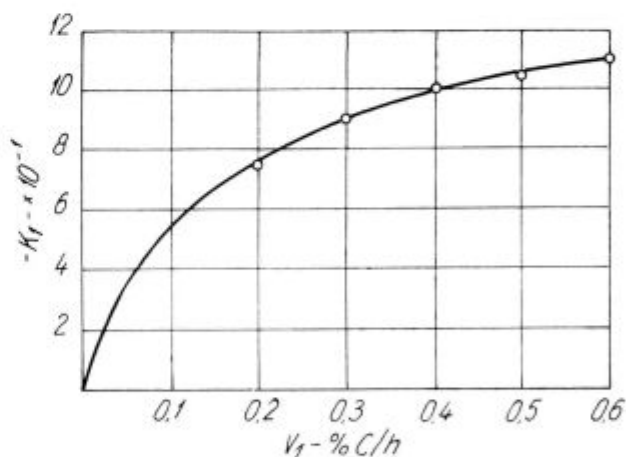
V obrazcu pomenijo:

F(Al) — odvisni faktor od dodatka aluminija (slika 5)



Sl. 5

K<sub>1</sub> — odvisni korekturni faktor od povprečne žilavilne hitrosti (slika 6)



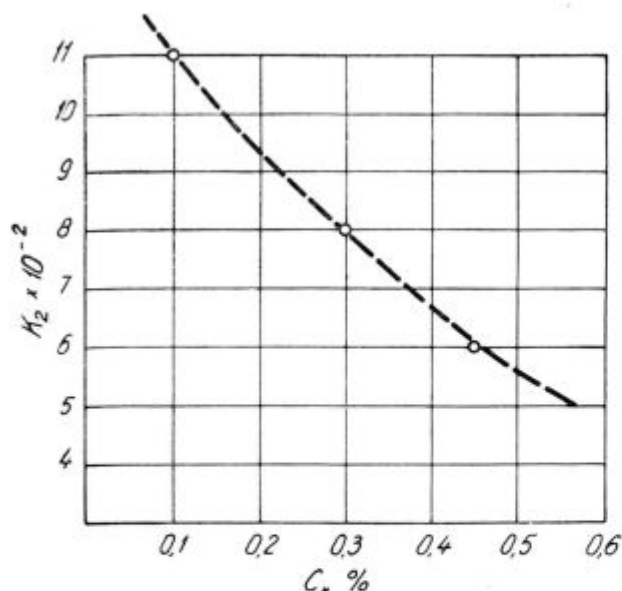
Sl. 6

K<sub>2</sub> — odvisni korekturni faktor od ogljika v izdelanem jeklu (slika 7)

C<sub>2</sub> — ogljik v izdelanem jeklu %

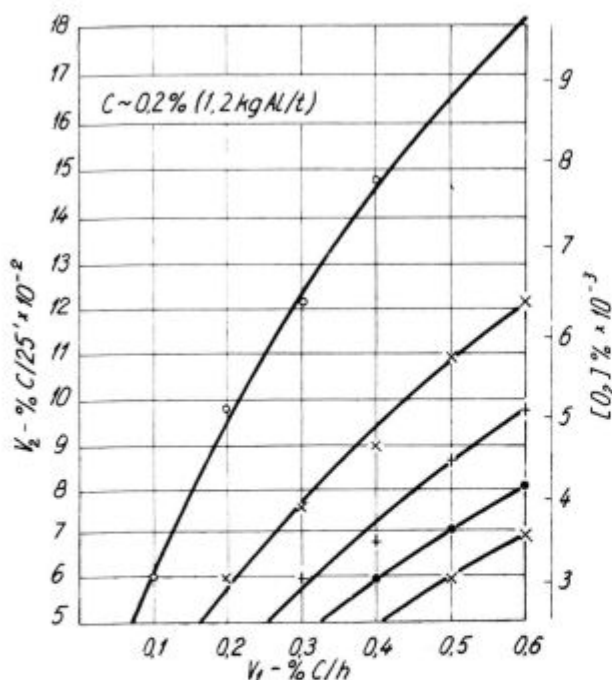
V<sub>1</sub> — povprečna žilavilna hitrost % C/h

V<sub>2</sub> — žilavilna hitrost v zadnjih 25 minutah rafiniranja



Sl. 7

Vse upoštewane konstante smo določili po primerjavah vpliva določenih vrednosti posameznih komponent na stvarno količino skupnega kisika, določenega po metodi z nosilnim plinom. Odstopanja v primerjavi so osnove za določitev vrednosti posameznih konstant. Praktično izdelujemo šarže z ogljikom med 0,12 in 0,2 % pri poprečni žilavilni hitrosti  $V_1 = 0,38$  do 0,52 % C/h in končni žilavilni hitrosti  $V_2 = 0,07$  do 0,1 % C/25 min. Pri učinkovitem dodatku 1,2 kg aluminija na tono jekla, pravilni temperaturi in zadostni baziciteti žilindre bo v izdelanem jeklu znašal skupni kisik okrog 0,0058 do 0,0075 % (slika 8).



Sl. 8

Skrajnih vrednosti žilavilnih hitrosti zaradi zmanjšanja kisika v praksi ne moremo sprožiti. S povečanjem dodatka aluminija nad optimalno mejo je sicer možno povečati delež kislinitopnega aluminija v talini, to pa le delno vpliva na zmanjšanje kisika.

Stvarno preostane le možnost, da z dodatkom ustreznih preddezoksidantov zmanjšamo kisik v talini že pred prebodom, kar zahteva za končno dezoksidacijo v ponvi manjši dodatek ferosilicija in aluminija. Tako nastane manj oksidnih komponent in bo torej v izdelanem jeklu manj skupnega kisika.

### Izdelava šarž s preddezoksidacijo

Da bi prikazali stvarni vpliv preddezoksidacije oziroma stopnjo učinkovitosti preddezoksidacije na zmanjšanje kisika ob koncu rafinacije, so nam v jeseniških SM pečeh A, M, V in K izdelali 18 nelegiranih šarž z 0,12 do 0,2 % ogljika. Za preddezoksidacijo smo uporabili silikomangan in silicijevo zrcalovino v količini, ki je vsebovala od 0,12 do 0,38 % silicija; za končno dezoksidacijo pa smo dodali aluminij.

Pri vseh šaržah smo vzeli vzorce za kisik po znani oziroma standardni metodi z malo prekrito kokilico, v kateri je aluminij, in sicer:

- vzorec št. 1 — ob koncu rafinacije pred dodatkom preddezoksidantov,
- vzorec št. 2 — po dodatku preddezoksidantov, ob različno dolgem času jemanja vzorca,
- vzorec št. 3 — v trenutku preboda,
- vzorec št. 4 — iz ponve 5 do 7 minut po prebodu,
- vzorec št. 5 — iz malega ingota, ki je bil odlit po končanem ulitju prve livne plošče.

V vzorcih št. 1—4 smo določili skupni kisik po metodi z nosilnim plinom, v vzorcih št. 5 pa poleg kisika tudi sestavo oksidnih komponent  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  in  $(FeO + MnO)$  z mikroanalizo izolatov.

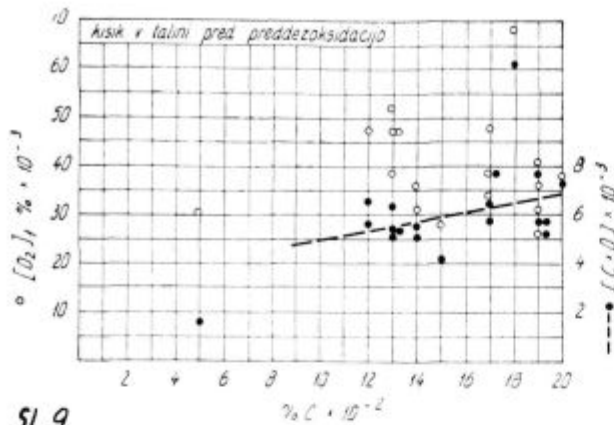
Z razpoložljivimi rezultati in s podatki, katere nam daje na voljo tehnologija izdelave šarž, smo poskušali pokazati praktični pomen vodenja rafinacije, izvedbo preddezoksidacije, časovni vpliv stopnje preddezoksidacije na kisik v talini ob času preboda ter stopnje dezoksidacije z aluminijem na vsebnost končnega kisika oz. vsebnost oksidnih vključkov v tem ingotu.

Na tabeli 1 navajamo:

1. uporabne parametre, katere daje tehnologija izdelavnega postopka in so vplivne komponente za analizo dezoksidacijske stopnje;
2. kemično analizo kisika v posameznih vzorcih
3. rezultate mikrokemičnih analiz izolata.

Ob primerjavi vrednosti kisika na koncu rafinacije (vzorec št. 1) se pokažejo neka odstopanja, ki ne sledijo ravnotežnim razmerjem z ogljikom, temveč zavzemajo vrednosti v zelo širokih mejah (slika 9). Pač pa moremo zaslediti splošno odvis-





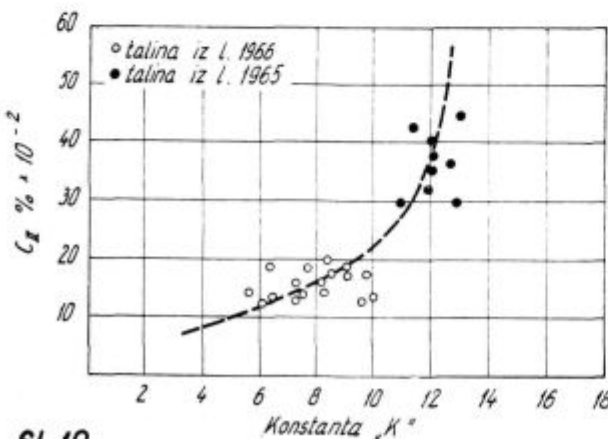
Sl. 9

nost produkta  $[C] \times [O]$  od ogljika: med vrednostjo ogljika 0,05 do 0,9 % bo produkt  $[C] \times [O]$  okrog 0,0035 do 0,01, kar ustreza vsebnosti kisika 0,07 do 0,011 %. Vpliv poprečne in deloma tudi končne žilavilne hitrosti na kisik ustreza že uvodoma navedenim razmerjem. Dodatek aluminija, ki naj upošteva koristni dodatek z ozirom na količino kislinotopnega aluminija v jeklu, vpliva na zmanjšanje kisika, vendar je ta vpliv neposredno odvisen od kisika v talini ob času preboda, ta pa je funkcija končnega ogljika, če sta ogljik in kisik uravnovešena. Menim, da potekajo reakcije v talini, ki je že v ponvi pretežno v uravnovešenih razmerah.

Med žilavilnimi hitrostmi in kisikom ob koncu rafinacije so odvisnosti, katerih poprečne vrednosti moremo zajeti v podobnem obrazcu, kot smo ga navedli uvodoma za kalkulacijo vrednosti skupnega kisika v izdelanem jeklu.

Obrazec za kalkulacijo količine kisika ob koncu rafinacije:

$$[O_2] = \frac{K}{C_2} \times \frac{0,4 \times K_1}{V_1} \times \frac{V_2}{K_2} \times 10^{-3} \%$$

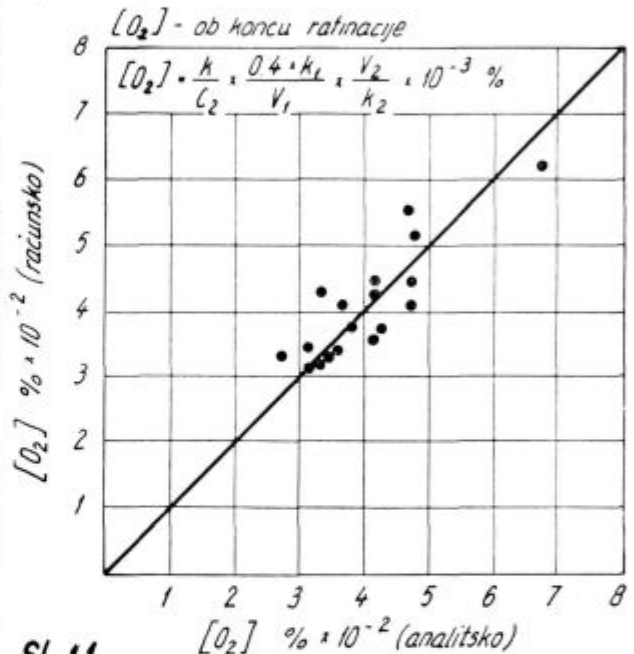


Sl. 10

Za jekla z 0,18 do 0,2 % ogljika smo ugotovili vrednost konstante  $K$  8 — 9, medtem ko je dajala ta vrednost pri mehkejših ali trših jeklih previsoke oziroma prenizke rezultate za kisik.

Pri primerjavi stvarnih in kalkulacijskih vrednosti kisika ob različnem ogljiku smo uporabili tudi rezultate prejšnjih preiskav višegljivičnih jekel, ter določili vrednost konstante  $K$  kot kaže mo na sliki 10.

Če vzamemo v pošte v vsa navedena razmerja konstant in žilavilnih hitrosti pri določeni vsebnosti končnega ogljika, lahko zadovoljivo kalkuliramo vsebnost kisika ob koncu rafinacije, ki je merilo za količinski dodatek predeoksidantov v peči oziroma končnih dezoksidantov v ponevi (slika 11).



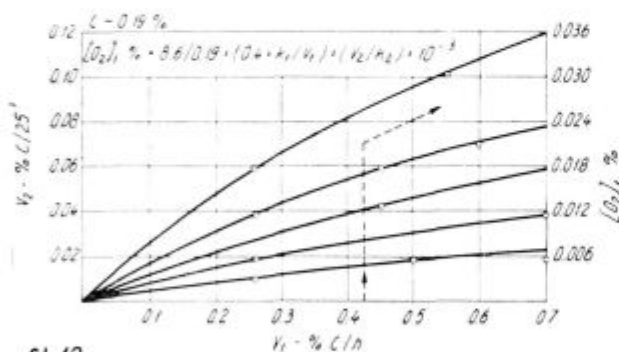
Sl. 11

Ta način kalkuliranja kisika ob koncu rafinacije ima uporabno vrednost z navedenimi konstantami pri normalnem toplotnem režimu in dodatku apna, ki ustreza baziciteti žilindre  $B_H$  — 2,2 do 2,5; to je praktično dosegljivo s specifičnim dodatkom apna 58—65 kg/t pri mehkejših jeklih, in 45—55 kg/t pri srednjegljivičnih jeklih, če je delež grodlja v vložku 40—50 % in Si v grodlju 0,5 do 0,6 %. Navedena razmerja ne ustrezajo pri šaržah, ki vsebujejo v začetku rafiniranja zelo malo ogljika.

Če pomislimo, da moramo v naslednji fazi po rafinaciji, to je z dezoksidacijo, odstraniti večji del prostega kisika v talini ob koncu rafinacije — v jeklu z 0,15 % ogljika znaša kisik 0,032 do 0,045 %, količina prostega kisika pa v pravilno izdelanem jeklu največ 0,002 % — hkrati pa moramo doseči z uporabo ustreznih dezoksidantov, da bo v izdelanem jeklu ostalo čim manj oksidnih

produktov in še ti v določenem medsebojnem količinskem razmerju, je vsekakor način, kako zajeti tako obsežno odstranjevanje kisika, eden najpomembnejših teoretičnih in praktičnih prijemov v izdelavnem postopku.

Obratovalni parametri in analiza vsebnosti kisika ob koncu rafinacije (vzorec št. 1) potrjujejo, da s povečanjem poprečne žilavilne hitrosti in zmanjšanjem končne žilavilne hitrosti vplivamo na znižanje kisika ob koncu rafinacije. Teoretične vrednosti navedenih razmerij navajamo na sliki 12.



Sl. 12

Če naj za praktično vrednotenje teh razmerij vzamemo možne obratovalne parametre pri normalnih pogojih dela, potem bi poprečna žilavilna hitrost za jeklo s končnim ogljikom med 0,16 do 0,2 % znašala najmanj 0,43 % C/h, končna žilavilna hitrost pa največ 0,08 % C/25 min. Pri jeklu z 0,12 do 0,15 % ogljika naj bi bila poprečna žilavilna hitrost najmanj 0,43 % C/h, končna pa največ 0,06 % C/25 min. Končno žilavilno hitrost računamo v času do dodatka preddezoksidantov v peči.

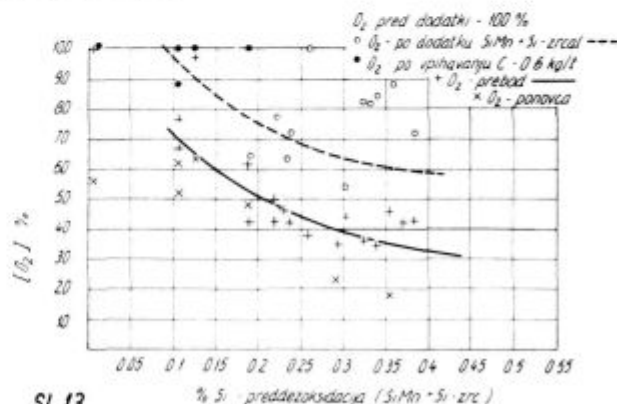
Povsem razumljivo je, da je tako z ozirom na čistost izdelanega jekla kot na ekonomiko proizvodnje zaželena čim manjša vsebnost kisika v talini ob prebodu, oziroma v ponvi pred končno dezoksidacijo. Izpust taline z veliko vsebnostjo kisika iz peči in prizadevanje, da bi zmanjšali kisik samo z dodajanjem dezoksidantov v ponev do želene stopnje čistosti, sta za praktika preveč tvegana za kvalitetno izdelavo jekla. Zato moramo smatrati možnost zmanjšanja kisika v talini že pred prebodom, to je s preddezoksidacijo v peči, kot nujno in redno fazo v tehnologiji izdelavnega postopka. Mislim, da rezultati na tabeli 1 — vsebnost kisika v vzorcih št. 1 in 3 — popolnoma potrjujejo obvezno izvajanje te prakse.

#### Analiza stopnje učinkovitosti preddezoksidacije

Preddezoksidacija omogoča občutno zmanjšanje kisika v talini, to pa je odvisno od količine preddezoksidanta in od časa reagiranja po dodatku preddezoksidantov. Z učinkovito preddezoksidacijo dosežemo v talini pred prebodom 0,013 do 0,016 % kisika proti 0,038 do 0,041 % kisika ob koncu rafinacije. Vsebnost kisika se zmanjša za

več kot 60 %; vendar poudarjam, da obsega to zmanjšanje tudi produkte medsebojnih reakcij preddezoksidanta in nevezanega kisika, to je dela še prostega kisika kot (FeO) in dela še preostalih oksidnih produktov dezoksidacije.

Za boljše primerjavo smo navedli na sliki 13 vrednosti kisika v odstotku vrednosti ob koncu rafinacije oziroma pred dodatkom preddezoksidantov. Pri povečanju stopnje preddezoksidacije se zmanjša vsebnost kisika, toda v času 7—8 minut po dodatku ugotavljamo, da so rezultati bolj raztreseni, v času 10—12 minut po dodatku, to je tik pred prebodom, pa so razlike v vrednosti znatno manjše.



Sl. 13

Po rezultatih vsebnosti kisika v ponvi okrog 5—6 minut po prebodu ni mogoče izdelati enotne krivulje, ker nastaja v talini z različnimi dodatki ferosilicija in aluminija že dokončna dezoksidacija. Razmerja na sliki 13 moramo podrobneje analizirati:

1. Vpliv silicija v količini preddezoksidantov v določenem času izrazimo s praktičnim obrazcem:

$$dO_2 = k \sqrt{\frac{1}{Si}}$$

$dO_2$  pomeni razmerje vsebnosti kisika po preddezoksidaciji do kisika pred dodatkom, torej najvišja vrednost 1 za primer neučinkovite preddezoksidacije, oziroma brez nje. Vrednost konstante  $k$  je odvisna od časa jemanja vzorca za določitev kisika po dodatku preddezoksidantov. Za čas 7—8 minut po dodatku smo ugotovili vrednost  $k = 0,34$  za čas 10—12 minut po dodatku (v trenutku preboda) pa  $k = 0,22$ .

Z navedenimi vrednostmi moremo zadovoljivo slediti krivulje na sliki 13.

Konkretno: pri 0,2 % Si iz količine preddezoksidantov v času 7—8 minut po dodatku bo  $dO_2 = 0,34 \cdot 1 /$

$$0,2 = 0,76$$

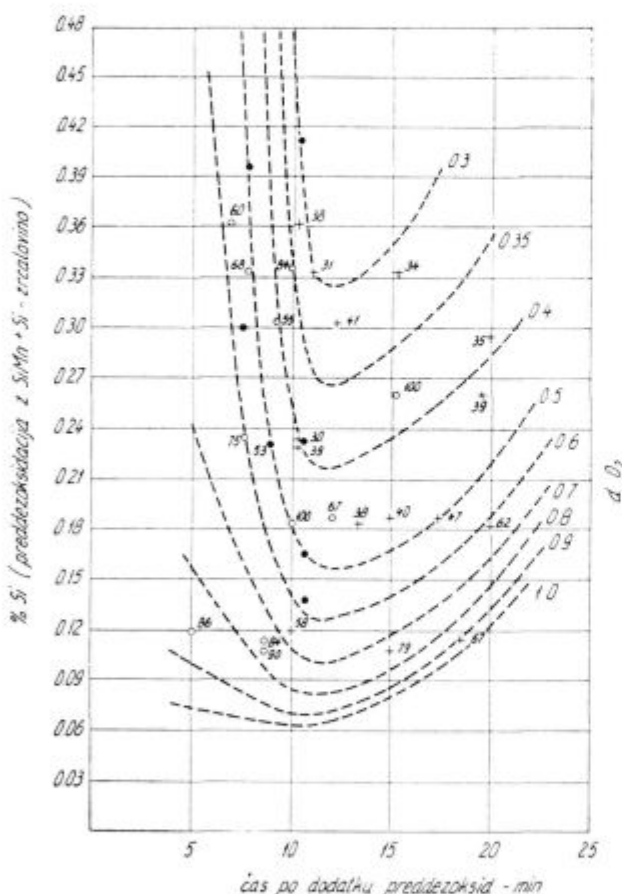
vsebnost kisika bo  $0,76 \times$  kisik pred dodatkom.

Pri 0,1 % Si iz količine preddezoksidantov v istem času po dodatku bo  $dO_2 = 1,07$ . To pomeni, da z dodanimi preddezoksidanti pri stopnji preddezoksidacije z največ 0,1 % Si praktično ni učinka, oziroma bo le minimalen. Praksa potrjuje, da je nujno določiti najmanjšo količino preddezoksidantov, ako naj vsaj deloma dosežemo učinek.

2. Razmeroma precej raztreseni rezultati vsebnosti kisika po sicer enakem dodatku preddezoksidantov so nastali zato, ker smo jemali vzorce št. 2 v različno dolgem času po dodatku.

Na tabeli 1 vidimo, da znaša čas po dodatku od 2—30 minut, kar utegne vplivati na kinetiko medsebojnih reakcij, predvsem pa na delež izločanja nastalih kompleksnih dezoksidacijskih produktov  $FeO \cdot MnO \cdot SiO_2$ .

Na sliki 14 smo poskusili zajeti vpliv časa po dodatku preddezoksidantov in vpliv vsebnosti Si v preddezoksidantih na  $dO_2$ . Ugotoviti moremo,

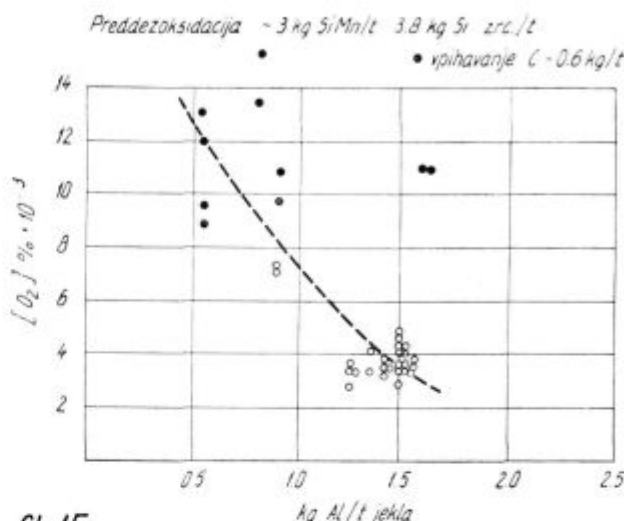


Sl. 14

da je učinkovitost preddezoksidacije odvisna od vsebnosti Si in od časa, ki ga dovolimo po dodatku za medsebojno reagiranje. Pri manjši vsebnosti Si je ta čas praktično manj pomemben, pri večji vsebnosti pa ima zelo pomembno vlogo. Kljub večjemu dodatku preddezoksidantov daje prekratek čas velik  $dO_2$ , predolg čas pa prav tako zmanjšuje stopnjo učinkovitosti. Pri količini Si od

0,15 % navzgor bo praktično 11—13 minut optimalni čas po dodatku za največji možni učinek preddezoksidacije.

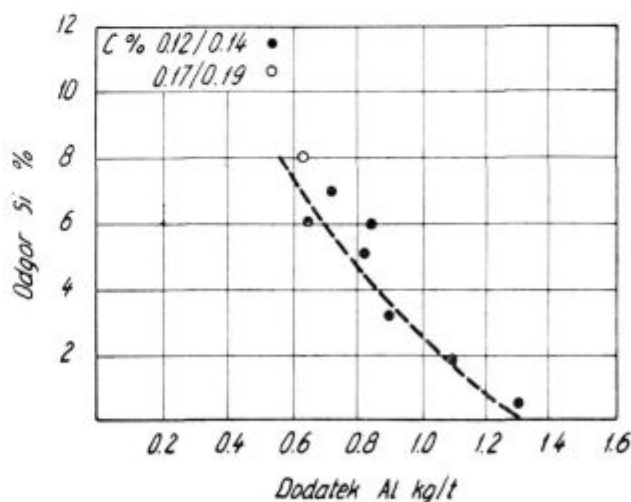
Dokončna dezoksidacija jekla je bila izvedena pri vseh poskusnih šaržah v ponvi z dodatkom ferosilicija in različnimi dodatki aluminija. Na sliki 15 kažemo vpliv aluminija na vsebnost konč-



Sl. 15

nega kisika v odlitem ingotu. Pri večini šarž znaša kisik okrog 0,003 do 0,0041 %, kjer smo pa zmanjšali dodatek preddezoksidantov v peči, in aluminija v ponvi, znaša končni kisik od 0,009 do 0,015 %.

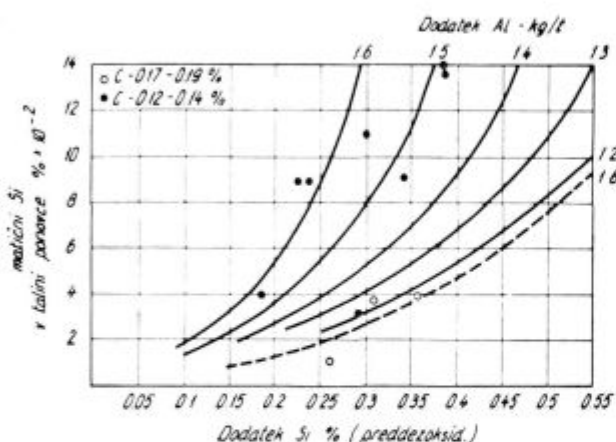
Šarža V5080 se ne ujema z navedenimi razmerji, ker je bila prehladna. Vpliv deleža kislinsotopnega aluminija v jeklu je tesno povezan s stopnjo preddezoksidacije. Čeprav so rezultati maloštevilni, lahko vendar sklepamo, da zmanjšuje vsebnost aluminija odgor silicija v preddezoksidantih, kakor vidimo na sliki 16. Pri okrog



Sl. 16

1,2 kg aluminija na tono za jeklo z 0,12 do 0,14 % ogljika ni več odgora silicija; pri povečanem učinkovitem dodatku aluminija pa se pokaže v talini

vsebnost matičnega silicija od preddezoksidantov. Približno medsebojno odvisnost dodatka aluminija in matičnega silicija ponazorujemo na sliki 17 za jeklo z 0,17 do 0,19 ‰ ogljika.



Sl. 17

### Učinkovitost dodatka aluminija

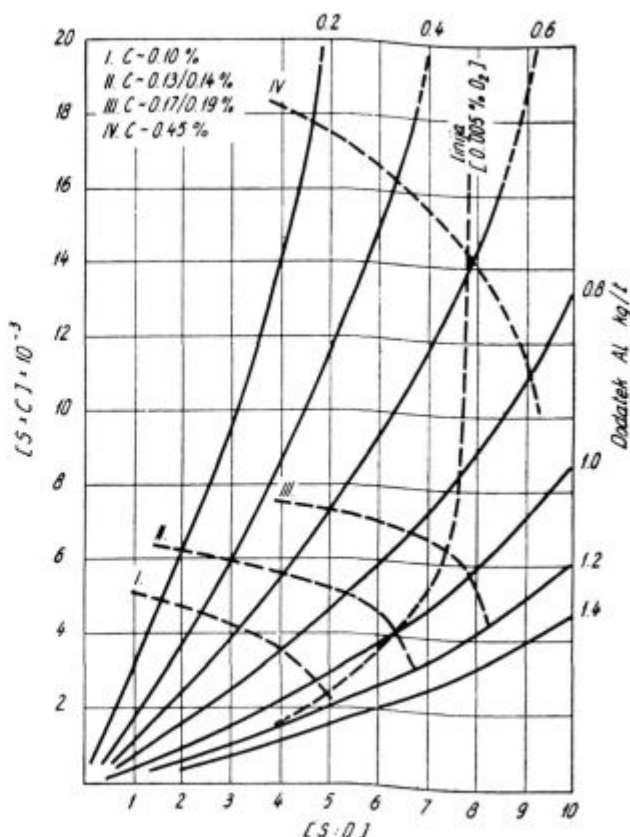
Glede dodatka aluminija moram poudariti, da je odvisen obseg reakcij, v katere mora posegati aluminij, od učinkovitosti tega dodatka. Praksa nam pove, da moremo z istim dodatkom aluminija in v enakih tehnoloških razmerah doseči v talini precej različne vsebnosti kislinotopnega aluminija. Praktično zanesljivo možnost ugotovitve stopnje učinkovitosti dodatka aluminija imamo s primerjavo produkta  $[C] \times [S]$  z razmerjem  $[S] : [O]$  za različne učinkovite dodatke aluminija. Z zasledovanjem rezultatov pri nizko — in srednje-ogljčnih kvalitetah dobimo razmerje med navedenimi tremi parametri, ki dovoljuje praktične zaključke:

— s povečanjem produkta  $[C] \times [S]$  raste vrednost  $[S] : [O]$

— povečanje učinkovitega dodatka aluminija vpliva na naraščanje razmerja  $[S] : [O]$ , vendar regresivno do določene vrednosti učinkovito dodanega aluminija.

Na statistični podlagi določena razmerja dajo optimalno krivuljo, ki predstavlja rezultat normalnih medsebojnih razmerij oziroma normalne tehnološke prakse. Odstopanja omogočajo zanesljivo vrednotenje stopnje učinkovitosti dodanega aluminija, če je bila temperatura taline pravilna (slika 18).

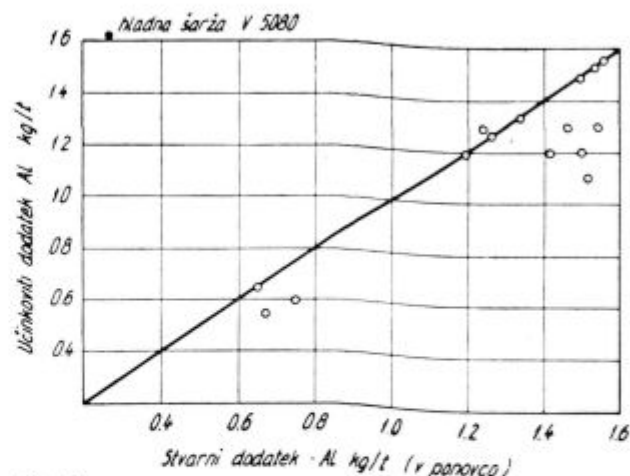
Konkretno: pri 0,17 do 0,19 ‰ ogljika bo normalna vrednost  $[C] \times [S]$  okrog 0,7 do 0,8 in  $[S] : [O]$  7—9, če znaša učinkoviti dodatek aluminija 0,9 do 1,2 kg/t. Pri večji ali manjši vrednosti produkta  $[C] \times [S]$  bo pri enakem dodatku aluminija vrednost razmerja  $[S] : [O]$  večja ali manjša. Če pri določenem produktu  $[C] \times [S]$  in nakazani količini dodanega aluminija ne dosežemo



Sl. 18

ustrezne vrednosti  $[S] : [O]$ , lahko zanesljivo sklepamo, da dodatek aluminija ni bil toliko učinkovit kot je bilo predvideno.

Če analiziramo konkretnih 18 šarž s tega vidika, ugotavljamo učinkovitost dodatka aluminija tako, kot kaže slika 19. V splošnem povzemamo, da dajejo razmerja pod normalnimi pogoji, še zadovoljivo stopnjo izkoriščanja, razen pri hladni šarži V5080.



Sl. 19

Po zgoraj omenjenih medsebojnih razmerjih vpliva tehnološke prakse na vsebnost kisika sklepamo sledeče:

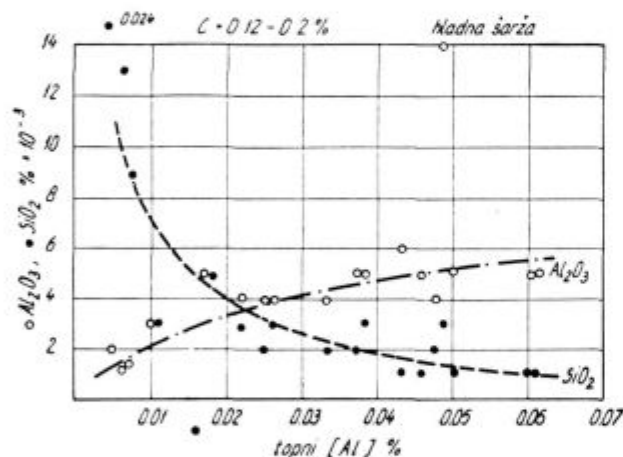
Za jeklo z 0,16 do 0,19 % ogljika je optimalni dodatek preddezoksidantov z vsebnostjo 0,2 do 0,3 % Si, čas preboda po dodatku 11—13 minut, učinkovit dodatek aluminija 1 do 1,2 kg/t, razmerje  $[S] \times [C] : [S] : [O]$  okrog  $0,55$  do  $0,75 \times 10^{-3}$ .

Za jeklo z 0,12 do 0,15 % ogljika je optimalni dodatek preddezoksidantov z vsebnostjo okrog 0,35 % Si, čas preboda po dodatku 11—13 minut, učinkovit dodatek aluminija 1,2 do 1,4 kg/t, razmerje  $[S] \times [C] : [S] : [O]$  okrog  $0,45$  do  $0,55 \times 10^{-3}$ .

### Analiza izolata in mehanizem dezoksidacije

Za kvaliteto izdelanega jekla ni pomembna samo skupna vsebnost kisika, temveč v enaki meri medsebojna količinska razmerja posameznih oksidnih komponent v vključkih. To ugotavljamo z mikroanalizo anodnih ostankov — izolatov.

Iz analize izolata, ki predstavlja srednjo vrednost treh rezultatov za vsako šaržo posnemamo, da je odvisnost med količino  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  in dodatkom aluminija oziroma količino topnega aluminija v jeklu povsem jasna. Pri večji vsebnosti aluminija je v oksidnih vključkih več  $Al_2O_3$ , manj  $SiO_2$ , in kot je razvidno na prejšnji sliki št. 15, tudi manj kisika (slika 20).



Sl. 20

Tabela 1 kaže posamezne rezultate mikroanalize izolata. Navedeni praktični parametri tehnologije izdelave šarže in nekatera specifična medsebojna razmerja rezultatov tehnologije in analize vključkov vsiljujejo vrsto vprašanj, ki so za prakso resnega pomena:

— kinetika reakcij v preddezoksidacijski fazi po časovni odvisnosti in vsebnosti silicija v preddezoksidantih,

— vpliv aluminija na razmerje med  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  in  $FeO$  ter kinetika reakcij z aluminijem zlasti v pogledu izločanja dezoksidacijskih produktov.

Na osnovi rezultatov takšne analize lahko določimo praktične parametre, katerih namen je povečanje čistote izdelanega jekla.

Za prakso zadovoljiv odgovor na zgoraj navedena vprašanja nam daje splošni mehanizem dezoksidacije.

V nadaljnjem navajamo nekatere karakteristične primere razlage vpliva tehnološke prakse in načina dezoksidacije, katero nam daje mehanizem dezoksidacije:

Šarža A5544 — C1206

C — 0,19 %, Si — 0,49 %, Mn — 0,45 %, Al — 0,048 %

$V_1$  — 0,33 % C/h,  $V_2$  — 0,08 % C/25 minut

Kalkulacijska količina kisika pred dodatkom preddezoksidantov znaša:

$$O_2 = 8,6/0,19 \times 0,4 \cdot 0,91/0,33 \times 0,08/0,095 \times 10^{-3} = 0,042 \%$$

Stvarna vsebnost kisika znaša 0,041 %.

Po dodatku silikomangana in silicijeve zrcalovine z vsebnostjo 0,38 % silicija ostane v trenutku preboda v talini količina 0,14 % matičnega silicija, ki je uravnovešena s približno 0,01 % prostega kisika. V času preddezoksidacije se razlika kisika  $(0,041 - 0,01) = 0,031$  % veže s silicijem, hkrati pa nastane okrog 0,062 %  $SiO_2$ . Iz peči gre talina z 0,017 %  $O_2$  (vzorec št. 3), zato ostane v njej poleg prostega kisika 0,01 % še 0,007 % vezanega kisika v obliki 0,014 %  $SiO_2$ . V času od dodatka preddezoksidantov do preboda se izloči torej približno  $(0,062 - 0,014) = 0,048$  %  $SiO_2$  ali 82 %. Izločitev te količine je bila izvedena v času 15 minut.

V ponvi bo v talini 0,014 % komponent  $SiO_2$ , iz obloge ponve pride okoli 0,006 %  $SiO_2$  (približno takšne vrednosti smo določili pri številnih dosedanjih raziskavah in tudi pri ugotavljanju teh razmerij ob zasledovanju vključkov z radioizotopi).

V jeklu je 0,49 % silicija, uravnovešenega z okrog 0,007 % prostega kisika. Razlika  $(0,01 - 0,007) = 0,003$  % kisika se veže s silicijem v 0,006 %  $SiO_2$ . Skupno se tvori 0,026 % komponent  $SiO_2$ .

Učinkoviti dodatek 1,2 kg aluminija/t tvori v talini 0,048 % kislinskega aluminija, uravnovešenega s sledovi prostega kisika.

Razlika  $(0,007 - 0,0005) = 0,0065$  % kisika se veže z aluminijem v okrog 0,013 %  $Al_2O_3$ .

Velika vsebnost aluminija dovoljuje obsežno redukcijo  $SiO_2$ ; iz analize izolata sledi, da je v vključkih še 0,002 %  $SiO_2$ . Razlika  $(0,026 - 0,002) = 0,024$  %  $SiO_2$  se reducira z aluminijem v približno 0,026 %  $Al_2O_3$ . Skupno se tvori 0,039 %  $Al_2O_3$ . Po analizi izolata je ostalo v vključkih okrog 0,004 %  $Al_2O_3$ , torej se je v konkretnem primeru izločilo  $(0,039 - 0,004) \cdot 100 : 0,039 = 88$  %  $Al_2O_3$  komponent.

V oksidnih vključkih bodo torej 0,004 %  $Al_2O_3$ , 0,002 %  $SiO_2$  in sledovi prostega kisika, kar da skupno 0,0035 % kisika. Analitsko določen znaša 0,0033 oziroma 0,0036 %.

Kalkulacija vsebnosti končnega kisika v izdelanem jeklu brez preddezoksidacije bi znašala:

$$O_2 = 0,8/0,19 \times 0,5 \cdot 0,91/0,33 \times 0,08/0,095 \times 10^{-3} = 0,006 \text{ ‰}$$

Zaradi učinkovite preddezoksidacije je skupni končni kisik v jeklu 42 ‰ manjši.

Šarža V5077 — Č03V

C — 0,13 ‰, Si — 0,17 ‰, Mn — 0,37 ‰, kislino-topni Al — 0,018 ‰,

V<sub>1</sub> — 0,59 ‰ C/h, V<sub>2</sub> — 0,1 ‰ C/25 minut.

Kalkulacijska količina kisika pred dodatkom preddezoksidantov znaša:

$$O_2 = 7,2/0,13 \times 0,4 \cdot 1,1/0,59 \times 0,1/0,104 \times 10^{-3} = 0,043 \text{ ‰}$$

Z metodo z nosilnim plinom določeni kisik znaša 0,047 ‰.

Pri tej šarži smo skušali vplivati z dodatkom 0,6 kg karburita na določena razmerja glede na stabilizacijo ogljika in ev. preddezoksidacijo. Kot razvidimo na tabeli 1, se je po dodatku le malo zmanjšal kisik v vzorcu.

10 minut po dodatku karburita smo dodali preddezoksidante z vsebnostjo 0,11 ‰ silicija. 5 minut po dodatku — v trenutku preboda — so bili v talini le sledovi silicija, uravnovešenega s približno 0,022 ‰ kisika. Razlika (0,044—0,022) = 0,022 ‰ kisika reagira s silicijem in tvori hkrati približno 0,044 ‰ SiO<sub>2</sub>. Iz peči gre talina z 0,032 ‰ kisika, torej vsebuje poleg 0,022 ‰ prostega kisika tudi 0,01 ‰ kisika v obliki 0,02 ‰ SiO<sub>2</sub>.

V 5 minutah po dodatku preddezoksidantov v peč se je torej izločilo (0,044—0,02) 100 : 0,044 = 54 ‰ SiO<sub>2</sub>.

V jeklu je 0,17 ‰ silicija, uravnovešenega s približno 0,019 ‰ kisika. Razlika (0,022—0,019) = 0,003 ‰ kisika se veže s silicijem in tvori približno 0,006 ‰ SiO<sub>2</sub>. Iz ponvine opeke pride okrog 0,006 ‰ SiO<sub>2</sub>; s talino iz peči pa 0,02 ‰ SiO<sub>2</sub>; skupna količina znaša 0,032 ‰.

Dodatek aluminija 0,87 kg/t (učinkoviti dodatek znaša 0,62 kg/t) daje talini približno 0,016 ‰ kislino-topnega aluminija, ki se uravnovesi z 0,005 ‰ kisika. Razlika (0,019—0,005) = 0,014 ‰ kisika tvori z aluminijem 0,028 ‰ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Redukcija SiO<sub>2</sub> do vsebnosti 0,005 ‰ (analiza izolata) da skupno 0,031 ‰ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Skupno se tvori 0,059 ‰ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Po analizi izolata ga zasledimo v vključkih 0,006 ‰, torej se je izločilo 90 ‰ skupno nastale količine komponent Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

V mehanizmu dezoksidacije pri tej šarži vidimo, da je po redukciji SiO<sub>2</sub> z aluminijem ostalo v vključkih še 0,005 ‰ SiO<sub>2</sub>, torej znatno večja količina kot pri prejšnji šarži. S primerjavo se potrjujejo rezultati številnih dosedanjih raziskav v tej smeri, namreč da vpliva vsebnost topnega aluminija na obseg redukcije. Pri količini od 0,015 do 0,02 ‰ moremo pričakovati že več ali manj obsežno redukcijo SiO<sub>2</sub>, pri manjših vsebnostih pa ni redukcije, oziroma je minimalna. Pri zelo veliki količini topnega aluminija so v vključkih le sledovi do 0,002 ‰ SiO<sub>2</sub>.

V oksidnih vključkih te šarže je 0,006 ‰ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0,005 ‰ SiO<sub>2</sub> in 0,005 ‰ prostega kisika, torej skupno 0,0105 ‰ kisika.

Analitsko ugotovljenega kisika je 0,0099 do 0,011 ‰.

Kalkulativna količina kisika znaša:

$$O_2 = 1,6/0,13 \times 0,5 \times 1,1/0,59 \times 0,1/0,104 \times 10^{-3} = 0,012 \text{ ‰}$$

S preddezoksidacijo smo torej zmanjšali kisik za približno 13 ‰. Menim, da je bila količina preddezoksidanta pri tej šarži mnogo premajhna, zlasti pa je bil majhen dodatek aluminija, zaradi česar se razmeroma poveča količina kisika oziroma oksidnih vključkov v jeklu.

Šarža V5073 — Č.03 V

C — 0,13 ‰, Si — 0,2 ‰, Mn — 0,42 ‰, Al — 0,005 ‰,

V<sub>1</sub> — 0,46 ‰ C/h, V<sub>2</sub> — 0,1 ‰ C/25 min.

Proti kisiku 0,047 ‰ pred dodatkom 0,6 kg karburita/t se je po dodatku zmanjšal kisik na 0,042 ‰. 8 minut po tem dodatku smo dodali še 0,11 ‰ Si v obliki silikomangana; 2 minuti kasneje pa, v trenutku preboda, so bili v talini le sledovi Si, kar je uravnovešeno s približno 0,015 ‰ kisika. Razlika (0,042—0,015) = 0,027 ‰ kisika reagira s silicijem in tvori 0,054 ‰ SiO<sub>2</sub>. Iz peči gre talina z 0,036 ‰ kisika, zato je v njej poleg 0,015 ‰ prostega kisika še 0,021 ‰ kisika v obliki 0,042 ‰ SiO<sub>2</sub>. Izločanje SiO<sub>2</sub> v času 2 minut po dodatku znaša 22 ‰. Iz mehanizma dezoksidacije pri prejšnjih šaržah ugotavljamo, da narašča s časom obseg izločanja SiO<sub>2</sub>. MnO . FeO (preddezoksidanti). Torej se bodo izločali ti oksidi v žlindro pri konkretni šarži V 5073 tudi v nadaljnjem času do litja livnih plošč. V času 17 minut, to je do začetka litja ingotov, bo delež izločanja okrog 85 ‰ in v vključkih bo ostalo približno še (15/100) . 0,042 = 0,006 ‰ SiO<sub>2</sub>.

V jeklu je 0,2 ‰ Si, ki je uravnovešen s ca. 0,01 ‰ kisika. Razlika (0,015—0,010) = 0,005 ‰ kisika reagira s silicijem; hkrati se tvori 0,01 ‰ SiO<sub>2</sub>. Iz ponvine opeke pride okrog 0,006 ‰ SiO<sub>2</sub>, skupno nastala količina SiO<sub>2</sub> znaša 0,022 ‰. Dodatek aluminija v količini 0,77 kg/t (učinkoviti dodatek znaša le 0,5 kg/t) da 0,005 ‰ topnega aluminija, ki je uravnovešen s približno 0,005 ‰ kisika. Razlika (0,010—0,005) = 0,005 ‰ kisika reagira z aluminijem v 0,010 ‰ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Po analizi izolata je v oksidnih vključkih 0,001 ‰ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, torej se je izločilo iz taline 90 ‰ komponent Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Zaradi majhne vsebnosti topnega aluminija ni redukcije SiO<sub>2</sub>. V oksidnih vključkih je 0,001 ‰ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0,022 ‰ SiO<sub>2</sub> in 0,005 ‰ prostega kisika, kar je skupaj približno 0,016 ‰ kisika. Analitsko določena količina kisika znaša 0,013 do 0,015 ‰. Kalkulacijska vrednost kisika v vzorcu, odlitem po odlitju prve plošče, znaša:

$$O_2 = 1,6/0,13 \times 0,5 \times 1,01/0,46 \times 0,1/0,104 \times 10^{-3} = 0,013 \text{ ‰}$$

Proti kisiku, določenem po mehanizmu dezoksidacije oziroma po analizi izolata, ugotavljamo

TABELA 1

Šarža	$V_1$ % $\Delta C/h$	$V_2$ % $\Delta C/25'$	$C \times S$	C %	Al kg/t	[Al] % topni	[O <sub>2</sub> ] % anal.	S : O	N <sub>2</sub> %
A 5554	0.33	0.08	0.0053	0.19	1.2	0.048	0.0033/36	8.2	0.0041 0.0038 0.0049
M 6323	0.06	0.03	0.0051	0.13	0.82	0.01	0.0070/71	5.5	0.0046 0.0045 0.0056
V 5047	0.55	0.07	0.0076	0.19	1.5	0.022	0.0038/41	10.1	0.0027 0.0032 0.0043
V 5044	0.67	0.13	0.006	0.2	1.54	0.025	0.0037/42	7.7	0.0022 0.0029 0.0042
V 5041	0.45	0.08	0.0074	0.19	1.56	0.050	0.003/41	11.1	
K 5067	0.70	0.09	0.0054	0.13	1.46	0.038	0.0043/46	9.6	
K 5068	0.28	0.12	0.0054	0.12	1.47	0.025	0.0042/38	11.2	
V 5063	0.38	0.11	0.0099	0.18	1.28	0.043	0.0034/41	15.0	
V 5073	0.46	0.1	0.0057	0.13	0.77	0.005	0.013/15	3.2	
V 5077	0.59	0.1	0.0049	0.13	0.87	0.016	0.011/099	3.8	0.0033 0.0037 0.0044
V 5080	0.15	0.06	0.0051	0.17	1.67	0.049	0.011/11	2.8 hl. š.	
V 5093	0.47	0.11	0.0068	0.17	0.63	0.007	0.0088/98	4.3	
V 5096	0.52	0.08	0.0056	0.14	0.67	0.006	0.013/12	3.2	0.0030 0.0031 0.0042
M 6309	0.51	0.07	0.0056	0.14	1.58	0.039	0.0037/36	11.1	0.0027 0.0034 0.0044
M 6310	0.38	0.1	0.0067	0.19	1.42	0.046	0.0033/36	10.1	0.003 0.0025 0.0046
M 6308	0.47	0.09	0.0046	0.14	1.55	0.062	0.0030/34	10.1	0.0025 0.0034 0.0043
A 5569	0.57	0.08	0.0075	0.17	1.25	0.061	0.0027/37	13.6	0.0034 — 0.0046
M 6305	0.43	0.08	0.006	0.15	1.35	0.033	0.0034/36	11.1	0.003 0.0034 0.0040

delno manjšo vrednost, torej bi smeli sklepati, da je verjetno delno izločanje SiO<sub>2</sub> tudi pri tvorbi SiO<sub>2</sub> od dodatka ferosilicija v ponev. Pri tej šarži se je konkretno v času 17 minut računsko izločilo približno 30—35 % SiO<sub>2</sub>.

Preddezoksidacija ni imela praktičnega učinka glede zmanjšanja kisika pred dokončno dezoksidacijo.

Šarža V 5080 — č. 1204

C — 0,17 %, Si — 0,12 %, Mn — 0,5 %, Al — 0,049 %,

$V_1$  — 0,15 % C/h,  $V_2$  — 0,06 % C/25 minut.

Na osnovi mehanizma dezoksidacije prejšnjih šarž obsega pri tej šarži izločanje SiO<sub>2</sub> 57 % v času 7 minut po dodatku preddezoksidantov. Dodatek aluminija 1,67 kg/t da v talini 0,049 % topnega aluminija, ki je uravnovešen s sledovi prostega kisika. Skupno nastala količina Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (reakcija aluminija s prostim kisikom in redukcija SiO<sub>2</sub> do 0,003 %) znaša 0,068 %. Če bi bila šarža normalno topla, bi moral biti delež izločanja komponent Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> okrog 88—90 %, kakor smo ugotovili pri prejšnjih

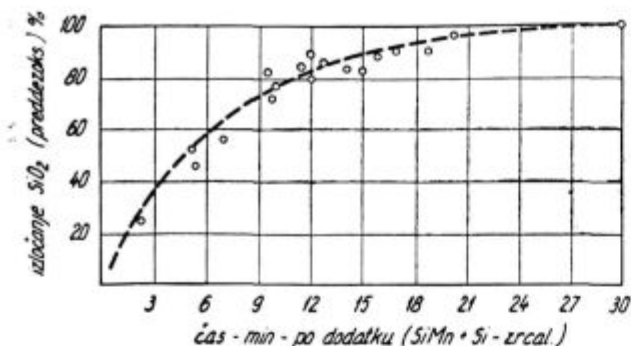
1	O <sub>2</sub> % anal.			Vključki (izolat)			(O <sub>2</sub> ) % iz vklj.	Čas po preddezoksid.		preddez. Si %	odgor Si ± %
	2	3	4	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	SiO <sub>2</sub> %	% (FeO+MnO)		min.	%		
0.041	0.029	0.017	—	0.004	0.002	0.002	0.0035	15'	82	0.38	+ 0.14
0.041	0.027	0.019	—	0.003	0.003	0.020	0.007	17'	90	0.19	— 0.05
0.034	0.024	0.014	—	0.004	0.003	0.004	0.0045	14'	86	0.23	+ 0.09
0.038	0.032	0.013	—	0.004	0.002	0.004	0.002	16'	88	0.34	+ 0.09
0.031	0.017	0.013	—	0.005	0.001	0.002	0.0035	12'	80	0.30	+ 0.11
0.041	0.048	0.016	—	0.005	0.001	0.009	0.005	19'	90	0.26	+ 0.01
0.047	0.039	0.014	—	0.004	0.003	0.004	0.0043	30'	100	0.32	+ 0.04
0.068	—	0.024	0.015	0.006	0.001	0.002	0.004	20'	97	0.29	+ 0.03
0.047	0.042	0.036	0.029	0.002	0.024	0.018	0.017	2'	22	0.11	— 0.07
0.047	0.044	0.032	0.024	0.005	0.005	0.022	0.010	5'	54	0.11	— 0.06
0.047	0.052	0.030	0.023	0.018	0.003	0.004	0.011	7'	57	0.18	+ 0.04
0.038	—	0.038	0.022	0.0015	0.009	0.022	0.010	—	—	—	— 0.08
0.031	0.035	0.033	0.020	0.0012	0.013	0.028	0.013	10'	72	0.12	— 0.06
0.043	0.039	0.016	0.009	0.005	0.003	0.002	0.0045	12'	77	0.36	+ 0.04
0.034	0.027	0.014	—	0.005	0.001	0.002	0.0035	10'	71	0.22	+ 0.09
0.034	0.028	0.012	—	0.005	0.001	sledovi	0.0031	12'	90	0.33	+ 0.11
0.031	—	0.013	—	0.006	0.0005	sledovi	0.0036	10'	78	0.37	+ 0.14
0.028	0.018	0.011	—	0.004	0.002	0.004	0.004	13'	87	0.23	+ 0.07

šaržah. Delež Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> v oksidnih vključkih bi znašal 0,007 %. Po analizi izolata pa dobimo v vključkih 0,018 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, kar pomeni, da se je izločilo približno le 73 % teh komponent. Vzrok slabšega izločanja je prenizka temperatura šarže. Zaradi prenizke temperature dobimo v vključkih 0,018 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0,003 % SiO<sub>2</sub> in sledove prostega kisika, kar da skupaj približno 0,011 % kisika. Analitsko določena količina je ista. Iz analize vzrokov slabšega izločanja Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oziroma prevelikega kisika pri tej šarži sklepamo, da je pri dezoksidaciji

jekla z aluminijem nujno potrebna višja temperatura kakor sicer pri dezoksidaciji ob minimalnem dodatku aluminija.

V navedenih nekaj primerih kaže mehanizem dezoksidacije kinetiko medsebojnih reakcij, nakazuje verjetnost nastanka posameznih oksidnih komponent, jasno osvetljuje količinski in časovni vpliv preddezoksidacije na zmanjšanje kisika na koncu rafinacije, zlasti pa potrjuje odločilno vlogo količine kislinitopnega aluminija v talini.





Sl. 21

Na sliki 21 je ponazorjen vpliv časa na obseg izločanja SiO<sub>2</sub> kot kompleksen oksid FeO . MnO . SiO<sub>2</sub> od preddezoksidacije, na sliki 22 pa primerjam delež izločanja med oksidnimi komponentami Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in SiO<sub>2</sub> kakor dovoljuje mehanizem dezoksidacije.

### Sklepi

V vzorcih nelegiranih SM jekel z 0,12 do 0,2 % ogljika smo zasledovali razmerja med kisikom, posameznimi oksidnimi komponentami v izolatu in tehnološko prakso izdelave šarž. Vzorci so bili vzeti iz taline z malo, z lesenim pokrovom prekrito standardno kokilo, v kateri je prebitek aluminija.

Vse šarže smo preddezoksidirali z določeno količino silikomangana in silicijeve zrcalovine; po dodatku sta bila vsebnost silicija v preddezoksidantih in čas reagiranja različna.

S takšnimi spremembami smo se lahko lotili študija in dosegli praktične rezultate o vplivu preddezoksidacije na vsebnost kisika v talini.

Medsebojno vrednotenje parametrov tehnološke prakse, analize oksidov v izolatu, analize kisika in stopnje učinkovitosti preddezoksidacije ter dodatka aluminija daje vrsto diagramov, po katerih lahko praktično sklepamo o osnovnih tehnoloških smernicah, kako bi v izdelanem jeklu dosegli čim manjšo količino oksidnih vključkov oziroma, da bi imeli takšno sestavo, ki dovoljuje zadovoljivo izločanje v žilindro.

Izločanje komponent Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> je zelo uspešno pri temperaturi okrog 1590 do 1600° C (pri konkretni kvaliteti). V talini ostane 8 minut po dodatku aluminija približno še 10 do 12 % teh oksidov, po 15—18 minutah pa približno 8—10 %. Po treh minutah znese delež izločanja okrog 65 %.

V odvisnosti od količine preddezoksidantov glede na vsebnost silicija, je optimalni čas za prebod med 11. in 13. minuto po dodatku. Prehitro in prepozno odpiranje preboda zmanjšuje stopnjo preddezoksidacije.

Pri konkretnih šaržah lahko znaša zmanjšanje kisika zaradi učinkovite preddezoksidacije okrog 30—45 % proti vrednostim kisika pri šaržah brez preddezoksidacije. Pri učinkoviti preddezoksidaciji znaša zmanjšanje dodatka aluminija 18—25 %. Pozitivni rezultati o vsebnosti kisika in količine oksidnih vključkov zahtevajo, da vključimo preddezoksidacijo v tehnološki cikel izdelave jekla kot obvezno delovno fazo.

## Identifikacija porekla eksogenih nekovinskih vključkov v jeklu z radioaktivnim cirkonijem

Z radioaktivnim cirkonijem Zr-95, ki smo ga vgradili v šamot, smo raziskovali, od kod pridejo v jeklo nekovinski vključki in koliko jih pride.

Ugotovili smo, da pride največ vključkov iz ponve, manj iz žleba in kanalske opeke.

Specifična obraba šamota je največja v kanalski opeki, manjša v žlebu, najmanjša pa iz ponve.

Ugotovili smo, da je iz šamota odplavljena aktivnost relativno homogeno razdeljena po ingotu ne glede na stopnjo desoksidacije jekla, medtem ko ustreznega šamotnega deleža ni moč ugotoviti v pomirjenem jeklu.

### Uvod

Od preboda šarže pa do končanega ulivanja jekla je talina v dotiku s proti ognju odporno keramiko. Zanima nas, koliko proti ognju odporne keramike odtali jeklo iz žleba, iz ponve in iz livne plošče, skratka, od kod izvirajo eksogeni vključki in koliko jih pride v jeklo. Dosedanje raziskovalne metode niso bile dovolj prepričljive, da bi mogle zanesljivo odgovoriti na naše vprašanje. Primerna uporaba radioaktivnih izotopov nam utegne sčasoma razvozlati marsikaj nejasnega.

Strokovna literatura šteje že precej objavljenih del s tega področja.<sup>1-11</sup> Ugotovitve posameznih avtorjev se ne ujema in so pretežno kvalitativne narave, tako n.p.r. zaradi različne izbire radioaktivnega izotopa, zaradi različne vrste preizkusnega jekla, zaradi različne sestave proti ognju odporne keramike, zaradi različne specifične aktivnosti keramike, zaradi različne merilne tehnike in podobno.

Iz izkušenj dosedanjega pionirskega dela smo lahko izluščili koristne napotke za naše raziskovalno delo. Bistvene razlike od dosedanjih del so naslednje:

1. V primeri z drugimi raziskovalci smo močno vzdignili specifično aktivnost zaznamovane keramike.

2. Zaradi višje aktivnosti smo lahko spopolnili tudi merilno tehniko, ter prišli do zanesljivejših ugotovitev.

3. Merjence smo pripravili neposredno iz ingota, da smo zasledovali porazdelitev vključkov *in situ*.

V tem članku bomo obravnavali zadevna poskusa, ki smo ju opravili z jeklom EPP-1 v Železarni Jesenice, v Železarni Ravne pa z OCR<sub>4</sub>.

### Izbira izotopa in specifična aktivnost proti ognju odporne keramike

Sevalci beta so kaj nepripravni za meritve, ker jih moremo meriti samo površinsko ali pa jih moramo izolirati iz jekla in šele nato meriti. Takš-

na tehnika je zelo težavna in zamudna. Zategadelj so prodorni sevalci gama primernejši. Odločili smo se za cirkonijev izotop Zr-95, ki ima srednje močne energije sevanja, ne predolgo razpolovno dobo in ni toksičen, a se da lepo pomešati z glino kot vezilnim sredstvom šamota.

Glede specifične aktivnosti keramičnih izdelkov smo se morali odločiti za visoko specifično aktivnost, če smo hoteli dobiti zanesljive meritve. Ruski avtorji<sup>2</sup> so uporabljali radioaktivni kalcij Ca — 45 do 150 mC/t, medtem ko so britanski avtorji<sup>8</sup> uporabili radioaktivni barij Ba — 140 do 360 mC/t. Poljaki so aktivirali šamot s 450 mC/t.<sup>6</sup> To so do sedaj najvišje nam znane uporabljene aktivnosti.

Za poskuse smo pripravili šamotno mešanico, ki je imela 1.500 mC/t, in phalno maso, ki je imela celo 3000 mC/t. Če si hočemo predstavljati v velikostnem redu vgrajene izotopove mase, moramo vedeti, da smo dali v 55 kg šamotne mešanice, na primer 4,7 µg aktivnega cirkonija, torej v razmerju približno 1:10<sup>-7</sup>.

### Priprava zaznamovanih proti ognju odpornih izdelkov

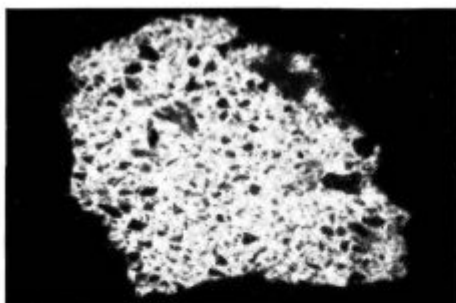
Samotno surovino smo vzeli iz redne proizvodnje. Za pol plastični postopek smo primešali šamotni mešanici odmerjen volumen radioaktivnega cirkonijevega oksalata v 0,5 odstotni oksalni kislini, zmes pa mešali v kotalniku 20 minut. Za plastični postopek smo pripravili maso v mešalniku.

Ponevčno opeko smo stiskali na ustrezni stikalnici, tako da smo nasuli v pregrajeni model na eno stran aktivno maso, na drugo pa neaktivno maso. Debelina aktivne mase je bila 1 do 1,5 cm na strani, ki je izpostavljena talini.

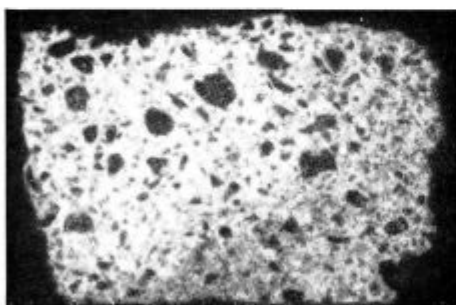
Vso votlo opeko smo ročno oblikovali na ustreznih lesenih modelih, razen srca in lijaka, ki ju redno oblikujejo ročno.

Phano maso smo ročno mešali in nanесли na žleb kakor delajo ponavadi v jeklarni.

Avtoradiografska posnetka izdelkov sta na sliki 1 in sliki 2.



Slika 1  
Avtoradiografski posnetek kanala



Slika 2  
Avtoradiografski posnetek cevi

### Vzorčevanje

Predvideli smo, da bomo vzorce jemali iz glave, sredine in noge izbranega ingota.

Pri jeseniškem poskusu z jeklom EPP1 smo imeli pet livnih plošč. V vencu okrog lijaka ima vsaka plošča po osem kokil. Za vzorce je prišel v poštev po en ingot s prve, tretje in pete livne plošče.

Na Ravnah so ulivali za jeklo OCR<sub>1</sub> 18 ingotov na posamezni plošči. Ingoti so razporejeni v treh venci okrog lijaka, torej trije ingoti na enem napajalnem kanalu. Za eno šaržo sta zadostovali dve plošči. Za vzorčevanje smo vzeli prvi in tretji ingot s posamezne plošče iz istega napajalnega kanala.

Iz vzorčnih ingotov smo izrezali plošče iz glave, sredine in noge: iz glave 10 cm pod vrhom, iz noge pa 10 cm nad dnom ingota. Iz jeseniških ingotov smo vzeli po dve plošči iz glave, tri iz sredine in dve iz noge, medtem ko smo iz ravenskih vzeli iz vsake ravnine samo po eno ploščo.

Iz pripravljene plošče smo izrezali palico po veliki diagonali, jo ostružili na  $\varnothing 15$  mm in narezali iz nje merjenec. Jeseniški merjenci so bili 70 mm dolgi, ravenski pa 35 mm. Vsak merjenec je bil oštevilčen, tako da je vsakemu natančno določena lega v ingotu posamezne livne plošče.

### Meritve

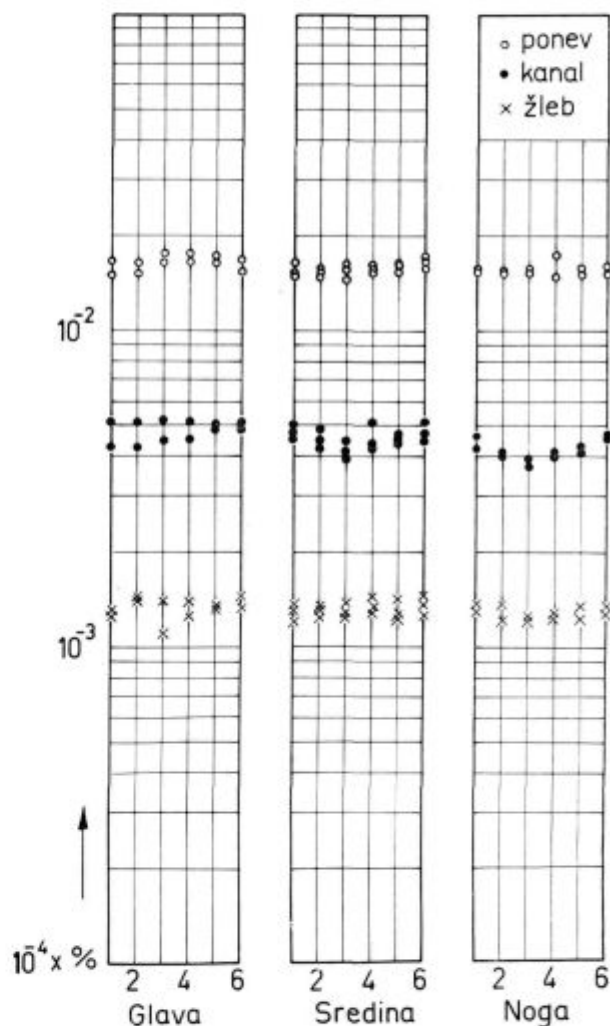
Merjencem smo zmerili aktivnosti v votlem kristalu scintilacijske merilne naprave. Ugotavljali smo samo one sunke, ki so karakteristični za cir-

konijev izotop. Širina kanala je bila 20 V. Comptonov efekt je pri tej merilni tehniki izključen, ozadje številne naprave pa zelo nizko. Med serijskimi meritvami smo stalno kontrolirali stabilnost aparature z ustreznim vzorcem aktivnega šamota. Tako smo dobili relativno najzanesljivejše rezultate.

Količino vključkov smo zračunali s pomočjo znane specifične aktivnosti šamotnega materiala, ki je ustrezal zadevni meritvi. Po znani specifični aktivnosti šamotnega materiala in po ugotovljeni specifični aktivnosti posameznega merjenca smo zračunali delež vključkov v merjencu.

Toda pri tem računu smo morali upoštevati vsaj še dvoje popravkov. Poznati smo morali namreč tudi faktor izotopnega razredčevanja in atenuacijski faktor. Faktor izotopnega razredčevanja je n. pr. razmerje med celotno in aktivno površino ponevčne stene, ki je bila v stiku s talino. Atenua-

### 1. livna plošča



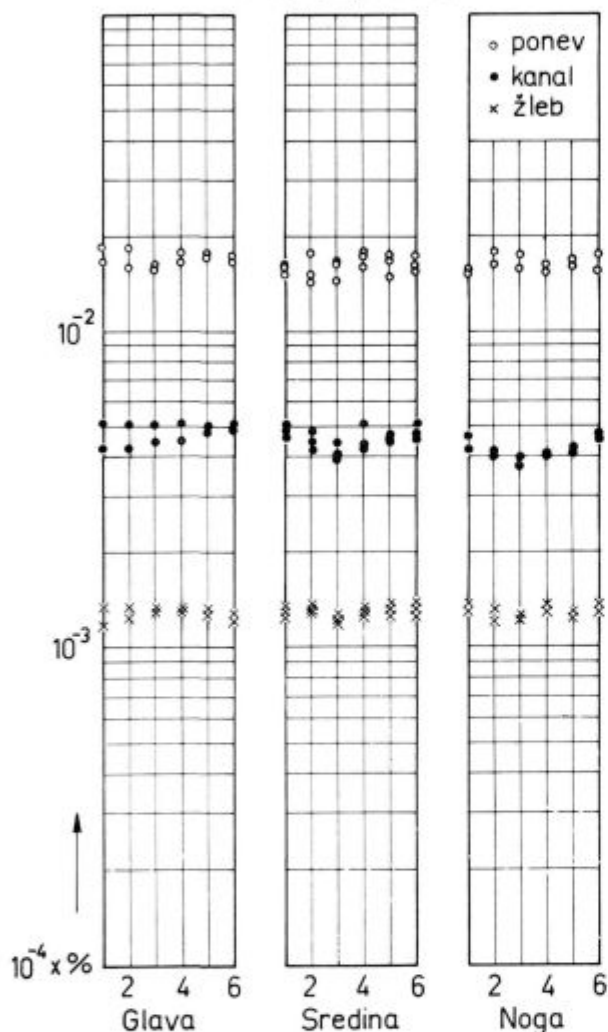
Slika 3

Grafični prikaz posameznih meritev za ingot s prve livne plošče jekla EPP1

cijski faktor pa pove koliko manj sunkov registriamo, ko oslabi žarek gama pri prehodu skoz merjenec. Eksperimentalno je ugotovljeno, da oslabi sevanje približno za 35 %, se pravi, da moramo za tretjino povečati ugotovljene rezultate.

V naslednjih grafikonih kažemo ugotovljene rezultate za posamezne poskuse in posamezne ravnine ingota, se pravi za glavo, sredino in nogo. V rezultatih nismo upoštevali atenuacijskega faktorja.

### 3. livna plošča



Slika 4

Grafični prikaz posameznih meritev za ingot s tretje livne plošče jekla EPP 1

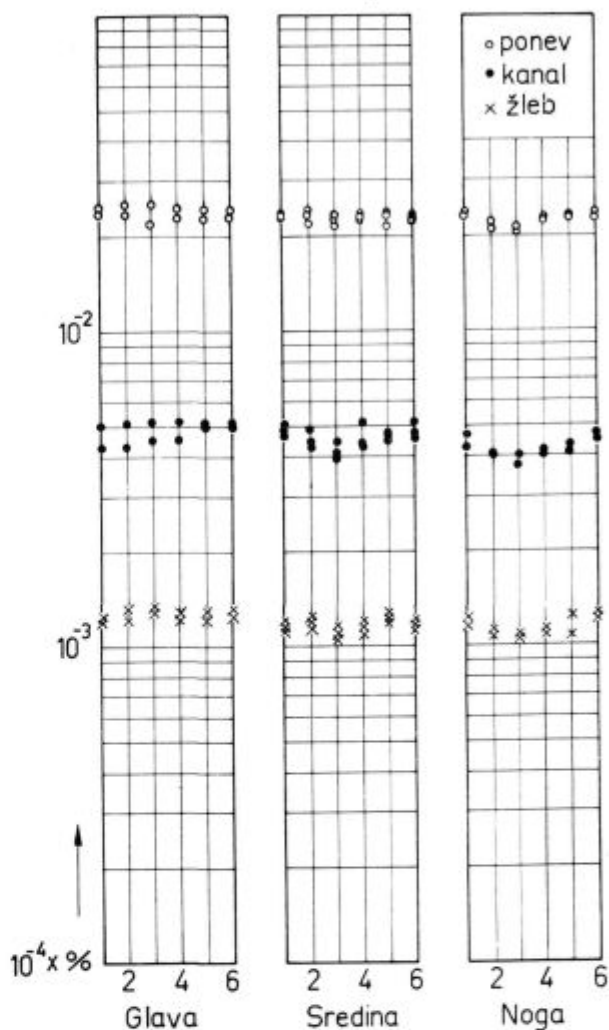
#### Analiza izolata

Z elektrolizo v Klinger-Kochovi aparaturi smo izolirali netopni izolat in zmerili njegovo aktivnost. Pri izolatu iz jekla OCR<sub>4</sub> smo dokazali, da je njegova specifična aktivnost od 30 do 40 odstotkov večja od specifične aktivnosti jekla.

Izolat smo analizirali na silicijev dioksid in aluminijev oksid. Rezultati niso pokazali kake posebne kongruentne odvisnosti med radiometrično ugo-

tovljeno količino vključkov in analitsko ugotovljeno količino silicijevega dioksida in aluminijevega oksida. Temu je verjetno krivo premajhno skupno število merjencev za izolacijo. Vzeli smo jih le 6 od skupaj 644.

### 5. livna plošča



Slika 5

Grafični prikaz posameznih meritev za ingot s pete livne plošče jekla EPP 1

#### Kisik po modificirani Abreschovi metodi

Rezultati kisika so prikladnejši za oceno. Omeniti moramo, da sta bili šarži B 4805 in B 4808 jekla EPPI zelo slabo dezoksidirani. Izrezane plošče so pokazale radialno usmerjeno luknjičavost po robu ingota, kar je značilno za slabo pomirjena jekla. Skladno s to ugotovitvijo so tudi rezultati kisika relativno zelo visoki. Če vzamemo poprečni faktor 2 za oceno količine silicijevega in aluminijevega oksida oziroma vključkov, gredo radiometrični rezultati po velikostnem redu vstric z rezultati kisika. Brž ko je pa v talini mehkega jekla, kot je n.pr. jeklo EPPI, navzoča prebitna količina aluminija, ali pa je difuzijska dezoksidacija dobro

potekla, kot je pri jeklu OCR<sub>1</sub>, in je nato dodan še aluminij, se je moralo nekaj dogoditi z odtaljenim šamotom v talini jekla.

V tem primeru pridejo radiometrični rezultati v navzkrižje z rezultati na kisik. Talina jekla se je sama očistila.

Omenjamo, da smo določevali kisik iz vzorcev polovične diagonale pri posamezni višini ingota od roba do sredine. Rezultati so navedeni v razpredelnici I.

Zanimalo nas je tudi, če moremo količkej zanesljivo določiti kisik v šamotu. Ugotovili smo, da se šamot reducira 90 odstotno. Ta ugotovitev je za naš sklep zelo važna.

#### Avtoradiografija izrezanih plošč

Polovico izrezane plošče najaktivnejšega poskusa z žlebom smo uporabili za avtoradiografijo. Avtoradiografija naj bi predvsem ugotovila, ali je

aktivnost resnično enakomerno porazdeljena po ingotu, kar bi podkrepilo radiometrične meritve. Razen tega bi utegnili dognati tudi makrovključke v jeklu.

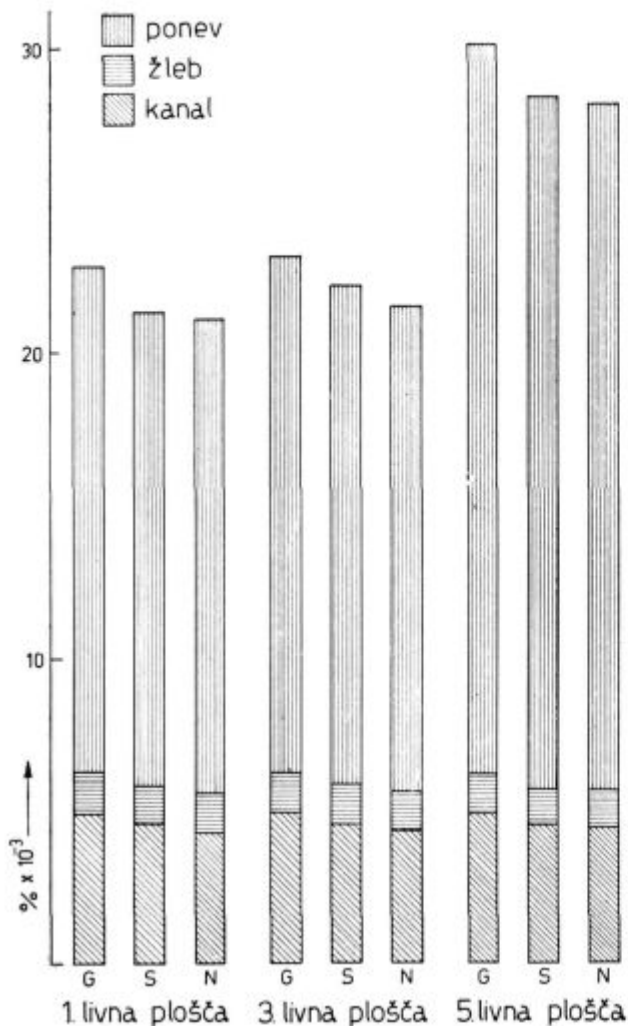
Skrbno razvite filme smo denzitometriral pri vseh vzorcih ugotovili, da je aktivnost enakomerno porazdeljena po ingotu. Le pri plošči Ž<sub>1</sub>G smo našli, da je bil v njej za lečo velik aktiven vključek. Aktivnost je izvirala iz poskusa z aktivnim žlebom. Vključek je bil ugotovljen v glavi 3. ingota iz 2. livne plošče.

#### Specifična obraba keramike

Iz poprečja radiometričnih rezultatov smo zračunali za jeklo OCR<sub>1</sub>, koliko se odtali žlebne mase, ponevčne in kanalske opeke. Ugotovili smo, da se iz žleba odtali 0,532 kg/m<sup>2</sup>, iz ponve 0,323 kg/m<sup>2</sup> na prvi plošči oziroma 0,361 kg/m<sup>2</sup> na drugi livni plošči in 1,74 kg/m<sup>2</sup> iz celega kanala.

Tabela: Kisik v polovični diagonali posamezne vzorčne plošče

Vrsta jekla	Sarža št.	Oznaka plošče	Merjenec št.	Aktivno	Kisik iz diagonale %	A 1 %
EPP 1	B 4805	L1/II glava	1	kanali	0,0161	0,007
			2	kanali	0,0145	0,007
			3	kanali	0,0131	0,007
		L6/II noga	41	kanali	0,0200	0,007
			42	kanali	0,0460	0,007
			43	kanali	0,0210	0,007
EPP 1	B 4804	P15/V glava	169	ponev	0,0190	0,002
			170	ponev	0,0192	0,002
			171	ponev	vzorec luknjičav	0,002
		P20/V noga	209	ponev	0,0195	0,002
			210	ponev	0,0327	0,002
			211	ponev	0,0269; 0,0173	0,002
EPP 1	B 4814	Z15/V glava	337	žleb	0,0044	0,040
			338	žleb	0,0039	0,040
		Z20/V noga	339	žleb	0,0046	0,040
			377	žleb	0,0054	0,040
			378	žleb	0,0052	0,040
			379	žleb	0,0064	0,040
OCR 4 pr.	40175	L29 glava	106	kanali	0,0036	> 0,03
			107	kanali	0,0042	> 0,03
			108	kanali	0,0048	> 0,03
		L2N noga	121	kanali	0,0033	> 0,03
			122	kanali	0,0040	> 0,03
			123	kanali	0,0043	> 0,03
OCR 4 pr.	40174	P4G glava	64	ponev	0,0079	> 0,03
			65	ponev	0,0067	> 0,03
			66	ponev	0,0075	> 0,03
		P4N noga	79	ponev	0,0064	> 0,03
			80	ponev	0,0066	> 0,03
			81	ponev	0,0061	> 0,03
OCR 4 ex. sp.	40210	Z4G glava	232	žleb	0,0048	> 0,03
			233	žleb	0,0053	> 0,03
			234	žleb	0,0054	> 0,03
		Z4N noga	247	žleb	0,0051	> 0,03
			248	žleb	0,0049	> 0,03
			249	žleb	0,0049	> 0,03



Slika 6

Poprečje meritev za posamezni poskus jekla EPP 1

### Sklep

Visoka specifična aktivnost proti ognju odporne materiala je omogočila, da smo z izbrano merilno tehniko nedvomno dokazali, da talina jekla ves čas in povsod, dokler in kjer je v dotiku s proti ognju odpornim materialom, bolj ali manj odtoplja proti ognju odporni material in ga fino dispergirane odnaša s seboj.

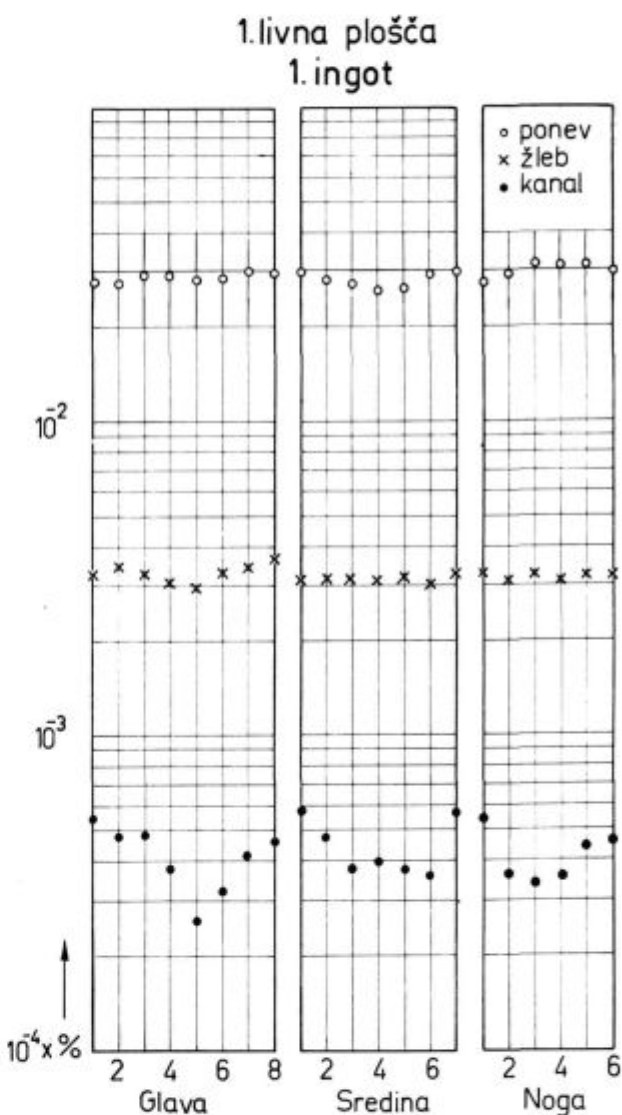
Poskus določitve kisika v šamotu z Abreschovo metodo in hipoteza, da fino dispergirani raztaljeni delci šamota niso podvrženi Stokesovemu zakonu, ter dokazana relativno homogena razporeditev aktivnosti v ingotu dajo misliti, da se je z odplavljenim šamotom moralo nekaj dogoditi v talini jekla. Menimo, da je utegnulo priti do redukcije šamotnih sestavin z ogljikom in s i t u.

Makrovključki utegnejo priti v jeklo po naključju bodisi kot posledica močnejše lokalne erozije, verjetneje kot posledica termičnega šoka taline na

šamot. V našem primeru je bil vključek vsrkan iz aktivne žlebne žindre, kar govori za to, da moramo previdno voditi proces ulivanja.

Specifična poraba proti ognju odporne materiala je odvisna predvsem od hidromehanskih vplivov taline na stene izzidave. Seveda vplivajo na obrabo tudi vrsta jekla, temperatura taline in, kar je za metalurga posebno pomembno, fizikalno kemična odpornost keramičnega materiala.

Prav gotovo daje naša raziskava nove, zanesljive osnove in podatke za statističen študij hidromehanike in kinetike procesov v talini jekla z namenom, da se pogloblja kakovost jekla.



Slika 7

Grafični prikaz posameznih meritev prvega ingota s prve livne plošče jekla OCR4

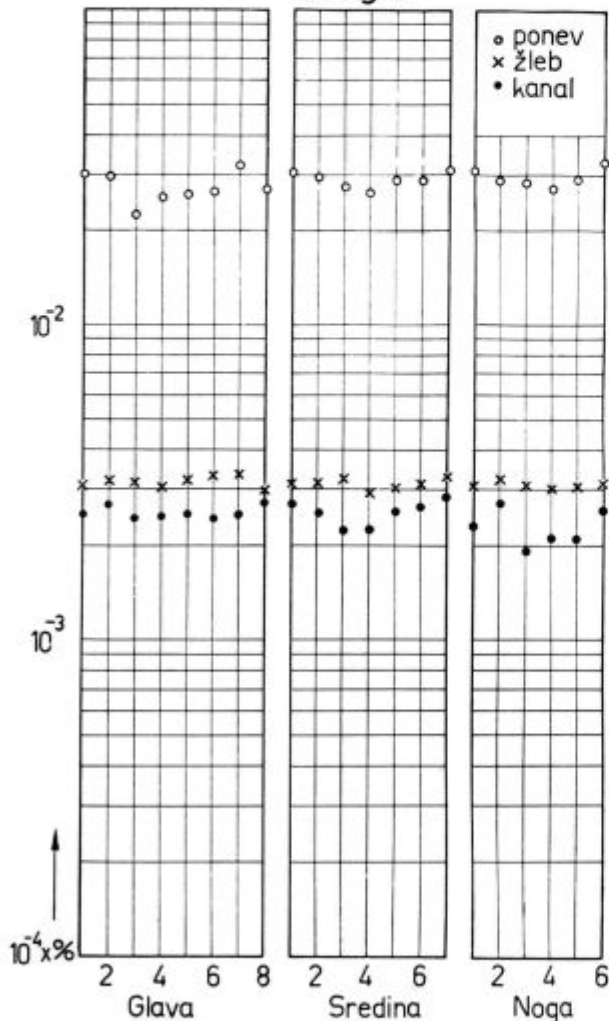
## Literatura

1. Grigorian, W. A., A. M. Samarin: Die Ermittlung der Ursachen der Verunreinigung von Wälzlagerstahl durch nichtmetallische Einschlüsse mit Hilfe von radioaktiven Ca-Isotopen: Izvestia Akademii Nauk SSSR, Otdelenie tehničeskikh Nauk 3, (1954), 91/101; loc. cit.: Chem. Zbl. 126 (1955) 5638/39
2. Samarin, A. M., E. S. Kalinnikov: Der Einfluss der Ausfütterung der Rinne und der Pfanne auf die Verunreinigung von Wälzlagerstahl durch nichtmetallische Einschlüsse. Sbornik 34, (1955), 190/230; loc. cit.: Chem. Abstracts 51, (1957), Sp 14513
3. Kronmarch, S.: Einfluss des feuerfesten Rinenn- und Pfannenfußers auf die Verunreinigung von Kugellagerstahl durch nichtmetallische Einschlüsse. (Anwendung des radioakti-

ven Isotops Ca-45), Neue Hütte 1 (1956), 505/508. (Izveček iz 2)

4. Fedock, M. P.: Über die Herkunft von nichtmetallischen Einschlüssen aus Giessgruben-Verschleisstoffen. J. Metals 6 (1954) 125/127; loc. cit.: Stahl u. Eisen 74, (1954), 843/844

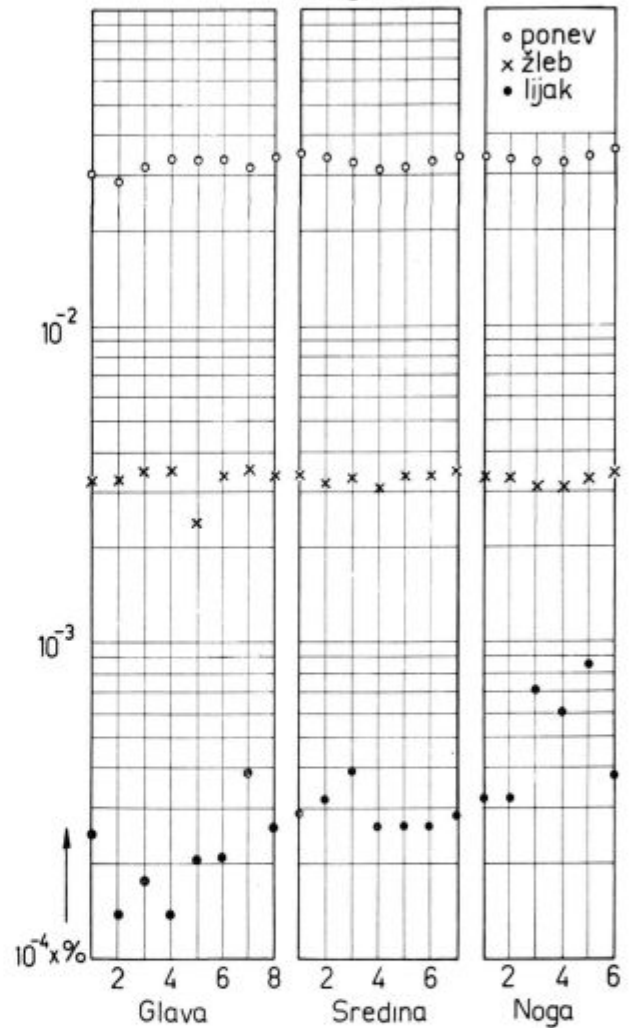
1. livna plošča  
3. ingot



Slika 8

Grafični prikaz posameznih meritev tretjega ingota iz istega kanala s prve livne plošče jekla OCR4

2. livna plošča  
1. ingot



Slika 9

Grafični prikaz posameznih meritev prvega ingota z druge livne plošče jekla OCR4

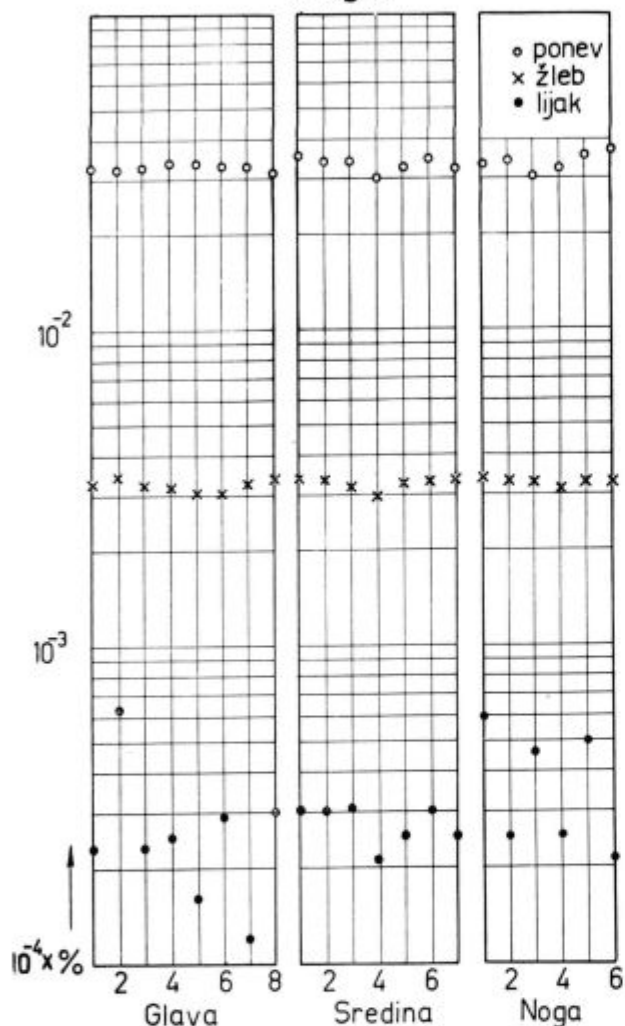
5. Marguliss, O. M., A. G. Karaulov: Anwendung des Verfahrens der »markierten« Atome zur feststellung des Einflusses feuerfesten Massen auf die Verunreinigung von Stahl durch nichtmetallische Einschlüsse. Ognjeupori 21 (1956), 253/258; loc. cit.: Chem. Zbl. 128, (1957), 5694/95
6. Bojarski, Z., W. Orzeszko, S. Pawlowski, R. Wusatowski, Z. Ziolkowski: An Assessment Trial of the Quality of Refractory Materials Used in Casting Pit and the Distribution of Non-metal-

lic Inclusions in Steel by Means of Radioactiv Tracers: Radioisotopes in Scientific Research, Pergamon Press 1958, 388/410

7. Saito T., R. Shimanuki: Source of Non-metallic Inclusions in Steel Ingot; Ibidem 362/374
8. Richardson, A. M.: The Use of Radioisotopes to Trace the Origin of Oxide Inclusions in Steel; ISI-SR 77, 57/63

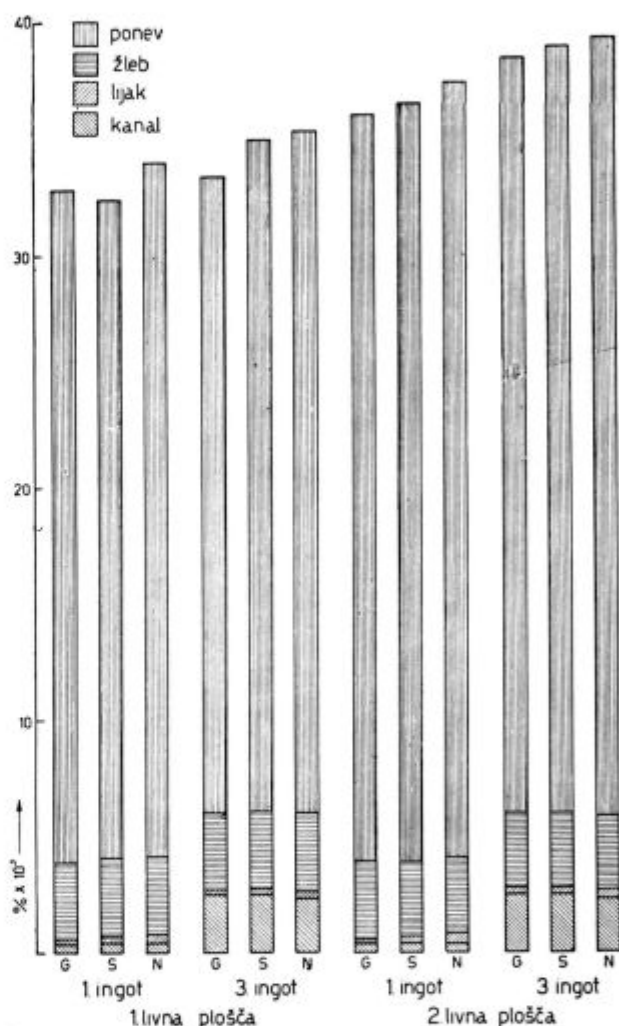
9. Pröpstl, G. H. I Radioaktive Markierungstechnik zur Untersuchung von metallurgischen Vorgängen im Stahlwerk; Stahl u. Eisen 13, (1960), 863/877
10. Treppschuh, H., E. Pachaly, K. Sauerwein, R. Schrötter: Untersuchung mit radioaktiven Leit isotopen über den Verschleiss feuerfester Geissteine und dessen Einfluss auf den Reinheitsgrad legierten Baustahls. Ibidem 878/882
11. Logi, P., L. Matteoli: Studio della origine delle inclusioni esogene negli acciai a mezzo di traccianti radioattivi; Metallurgia it. 9, (1964), 443.

2. livna plošča  
3. ingot



Slika 10

Grafični prikaz posameznih meritev tretjega ingota iz istega kanala z druge livne plošče jekla OCR4



Slika 11

Poprečje meritev za posamezni poskus jekla OCR4



## Visokotemperaturna cementacija

### I. DEL: NAČIN CEMENTIRANJA, DOLOČITEV OSNOVNIH PARAMETROV CEMENTA- CIJE IN METALOGRAFSKE PREISKAVE

V napravi za cementiranje v mestnem plinu smo cementirali vzorce jekel Č. 4320 in Č. 7420 po 2, 4, 6 in 8 ur pri temperaturah 900, 950 in 1000°C. Določili smo osnovne parametre teh cementacij: gradient koncentracije ogljika, globino cementacije, standardno cementacijo in površinsko količino ogljika. Zaradi nadzora velikosti kristalnih zrn smo preiskali cementirane vzorce tudi metalografsko.

#### Uvod in dosedanje raziskave

Površinsko utrjevanje jekla s cementacijo je postopek, ki je kljub dolgi tradiciji v nenehnem razvoju. Velikoserijske proizvodnje zahtevajo ustrezna cementacijska sredstva in agregate, cene postopke in jekla, ki tudi pri enostavnih toplotnih obdelavah dajo izdelke odličnih mehanskih lastnosti. Cementacija v plinu je postopek, ki vse bolj izriva dražje cementiranje v trdnih sredstvih in solnih kopelih. Direktno kaljenje po končani cementaciji že uspešno poenostavlja in pocenjuje toplotne obdelave, toda za to je bil potreben razvoj jekel, ki brez škode vzdržijo takšno toplotno obdelavo. Tudi razvoj visokotemperaturne cementacije, to je cementiranje pri višjih temperaturah kot so bile do sedaj v navadi, skrajšuje cementacijo, bolje izkorišča peč in naposled zmanjšuje stroške.

Namen naše raziskave je ugotoviti osnovne parametre visokotemperaturne cementacije, obenem pa dobiti z različnimi metalografskimi in mehanskimi preiskavami nekaj podatkov in rezultatov, po katerih bomo lahko usmerili nadaljnje raziskave na tem področju.

Razen posameznih primerov, do zadnje vojne ni bilo obsežnejših raziskav visokotemperaturne cementacije. Nasprotno, cementacija nad 860°C je veljala za »smrtni greh«, kot pravi C. Albrecht v svojem članku (1). V zadnjem desetletju pa je bilo objavljenih že več del, ki pojasnjujejo razne pojave in vplive na takšno cementacijo. Cementacija raziskujejo pretežno do 1000°C, ker višje temperature ne dajejo več prednosti, razen morda v posebnih primerih.

C. Albrecht (1) je cementiral jeklo C 15 pri temperaturah 930, 960 in 980°C v aktivirani cianidni solni kopeli. Cementiral je po 2, 4 in 6 ur. Ugotovil je, da z višjo temperaturo narašča globina cementacije, površinska količina ogljika pa skoraj nič ne naraste (komaj za 0,1% med 930 in 980°C). Pri direktno kaljenih vzorcih je opazil, da je struk-

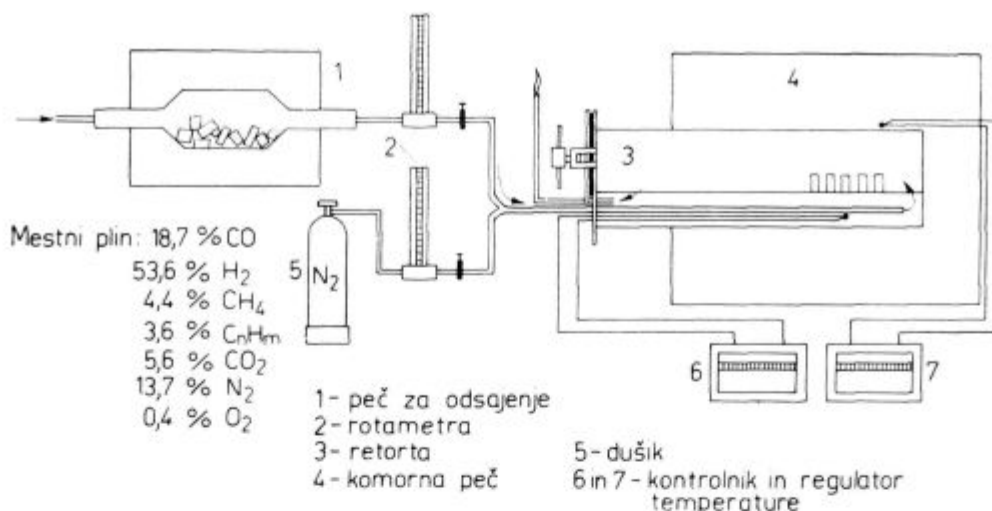
tura kaljene površinske plasti nekoliko grobejša pri vzorcih, ki so bili cementirani pri višjih temperaturah, vendar temperatura cementacije prav nič ne vpliva na izoblikovanje strukture, ako so bili vzorci kaljeni iz nižje temperature (C 15 iz 780°C, 16 MnCr 5 iz 860°C). Pričakovali bi, da bo po direktnem kaljenju iz višje temperature več zaostalega avstenita kot iz nižje, vendar je ravno nasprotno — avtor sodi, da je odločilen krajši čas cementiranja pri višji temperaturi.

B. Finern (2) je raziskoval vpliv povečanja cementacijske temperature v solni kopeli od 930 na 980°C na trajno trdnost in spremembo mer. Cementacijo je uravnaval tako, da površinska količina ogljika nikdar ni preseгла 0,9%. Ugotovil je, da pri jeklih 20 MoCr 4, 16 MnCr 5 in SAE 4320 H temperatura cementacije ne vpliva na trajno trdnost. Spremembe mer je raziskoval na zobnikih, vendar tudi v teh primerih ni ugotovil nobenega vpliva različnih cementacijskih temperatur in načinov kaljenja.

Podobno vsebino imajo tudi druge dosedanje raziskave. Molibdensko jeklo 20 MoCr 4 oziroma Č. 7420, razvito za direktno kaljenje, je zelo primerno tudi za visokotemperaturno cementiranje. Tudi sovjetska strokovna literatura opozarja na široki razmah visokotemperaturne cementacije zlasti v plinih.

#### Načini cementiranja in vrste jekel

**Cementacijsko sredstvo in naprava:** Zaradi večje industrijske uporabnosti smo se odločili za plinsko cementacijo. Po več preizkusih z mešanici mestnega plina z dušikom, butanom in propanom smo ugotovili, da je sam mestni plin zelo ugodna plinska mešanica, le da nekoliko preveč saj. Cementirali smo v vodoravni retorti z dovodom in odvodom plina na eni strani, zato je plin sajil ponajveč že v dovodni cevi in jo mašil. Zato smo predhodno speljali plin skozi retorto z železnimi kosi, ter jo segrevali na 900°C. Slika 1 kaže



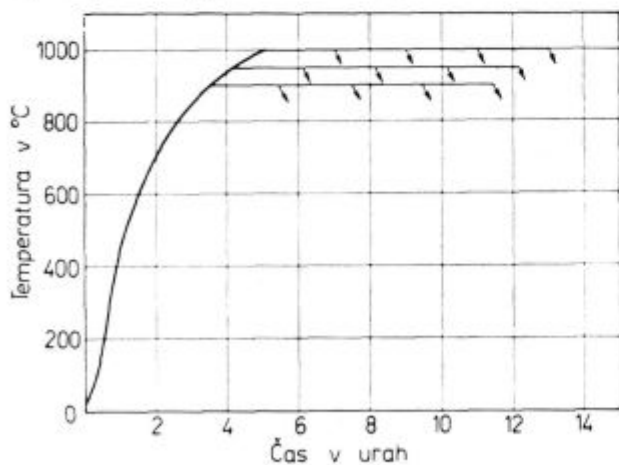
Slika 1  
 Shema cementacijske naprave

shemo cementacijske naprave. Plin je šel skozi odsajevalno retorto in rotameter v cementacijsko retorto, na koncu odvodne cevi smo ga sežigali. Vzporedno s plinsko napeljavo smo napeljali tudi dušik za splakovanje retorte po končanih preskusih in pri direktnih kaljenjih. Temperaturo smo uravnavali s termoelementom v peči, nadzorovali pa s termoelementom, ki je v retorti segal do vzorcev. Sestava mestnega plina je na tabeli 1.

TABELA 1 — Sestava mestnega plina

% CO	% H <sub>2</sub>	% CH <sub>4</sub>	% C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	% CO <sub>2</sub>	% N <sub>2</sub>	% O <sub>2</sub>
18,7	53,6	4,4	3,6	5,6	13,7	0,4

Nismo ugotavljali najugodnejšega pretoka plina skozi retorto. Pri vseh cementacijah je bil pretok, ki ga je kazal rotameter, 120 l/h: ker je pa rotameter umerjen za zrak s spec. težo 1,293 kg/m<sup>3</sup>, je bil resnični pretok plina s specifično težo 0,687 kg/m<sup>3</sup> večji, in sicer 165 l/h.



Slika 2  
 Naraščanje temperature vzorcev

### Temperaturni in časovni režim cementacij:

Vzorci smo cementirali na 900, 950 in 1000° C v različnih časih: 2, 4, 6 in 8 ur. Vzorci smo segregirali obenem z retorto oziroma s pečjo, ker tako najbolj ustreza razmeram industrijskih cementacij v talilnih pečeh. Slika 2 kaže naraščanje temperature vzorcev. Čas cementacije smo začeli meriti, ko je dosegla temperatura 900, 950 oziroma 1000° C. Upoštevati pa moramo, da so bili vzorci, ki smo jih cementirali npr. na 1000° C, predno so dosegli to temperaturo, že dve uri v temperaturnem območju 850 do 1000° C, v katerem je že potekala tudi cementacija. Vzorci smo hladili s počasnim premeščanjem v hladni del retorte.

Vzorci so bili valji, premera 20 mm in dolžine 50 mm.

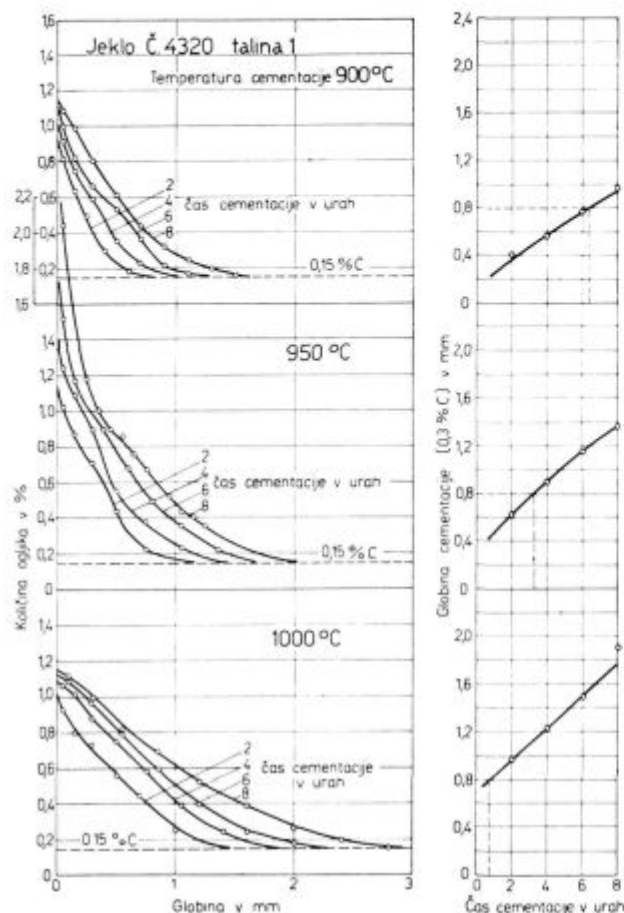
**Jekla:** izbrali smo dve talini jekla Č. 4320 in eno talino jekla Č. 7420, katerih kemično sestavo kaže tabela 2.

TABELA 2 — Kemična sestava preskušanih jekel

Element	Č. 4320 Talina 1	Č. 4320 Talina 2	Č. 7420
C	0,15	0,18	0,19
Si	0,32	0,27	0,27
Mn	1,04	1,14	0,73
P	0,03	0,024	0,02
S	0,019	0,021	0,016
Cr	0,96	0,84	0,43
Ni	0,13	0,14	0,14
Mo	0,07	0,06	0,45
Al <sub>netopen</sub>	0,006	0,004	0,004
Al <sub>topen</sub>	0,017	0,031	0,003
Velikost zrn	5	6	8

## Določitev osnovnih parametrov cementiranja pri različnih temperaturah

**Gradient koncentracije ogljika:** Slike 3, 4 in 5 kažejo, kako se spreminja količina ogljika v glo-



Slika 3

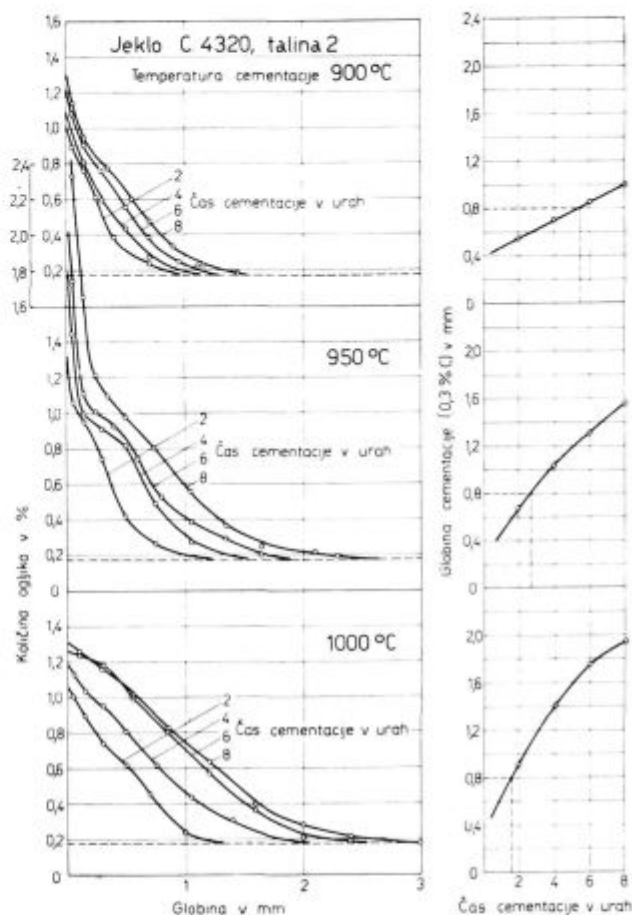
Količina ogljika v cementirani plasti po različnih temperaturah in časih cementiranja in globina cementacije v odvisnosti od časa cementiranja za jeklo Č. 4320, talina 1

bino po različnih časih cementiranja pri temperaturah 900, 950 in 1000°C. Desni del diagramov pa kaže odvisnost cementacijske globine od časa cementiranja pri različnih temperaturah. Količine ogljika smo ugotavljali s kemično analizo odstruženih plasti. Globine cementacije, katere navajamo, so tiste globine, do katerih padejo količine ogljika na 0,3 %.

**Globina cementacije** narašča z višjo temperaturo cementiranja in z daljšim časom. Med preiskovanimi jekli ni bistvene razlike, zato navajamo v nadaljnjem poprečne podatke. Globina cementacije je po doseženi cementacijski temperaturi 900 in 950°C okoli 0,32 mm, pri 1000°C pa okoli 0,65 mm. Od 2. do 8. ure cementiranja pa so hitrosti cementiranja, izražene v mm/h kakor sledi:

- pri 900°C ... 0,085 mm/h (indeks 100)
- pri 950°C ... 0,135 mm/h (indeks 159)
- pri 1000°C ... 0,166 mm/h (indeks 196)

S povečanjem cementacijske temperature od 900 do 1000°C se torej poveča hitrost cementiranja približno za 100%. To je razumljivo, ker je tudi gibljivost ogljikovih atomov pri višjih temperaturah večja. J. Pomey navaja sledeče koeficiente difuzije ogljika v železu: pri 900°C  $4.10^{-7}$ , pri 950°C  $9.10^{-7}$  in pri 1000°C  $20.10^{-7}$  cm<sup>2</sup>/s.



Slika 4

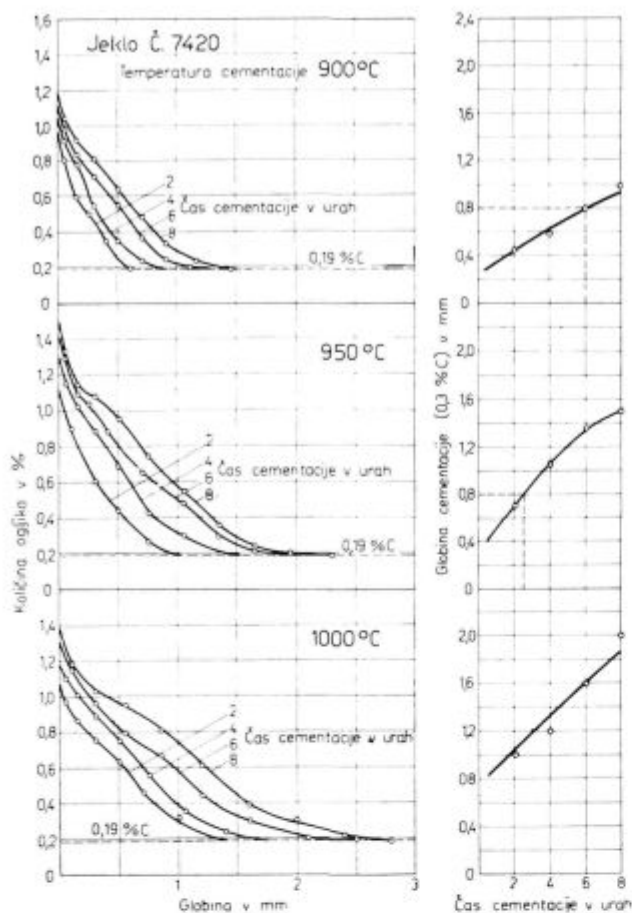
Količina ogljika v cementirani plasti po različnih temperaturah in časih cementiranja in globina cementacije v odvisnosti od časa cementiranja za jeklo Č. 4320, talina 2

**Standardna cementacija:** Za standardno cementacijo smo vzeli cementacijo z 0,3 % C v globini 0,8 mm. Ta je dosežena (slika 6)

- pri 900°C po 6 urah cementiranja,
- pri 950°C po 3 urah cementiranja in
- pri 1000°C po 1 uri cementiranja.

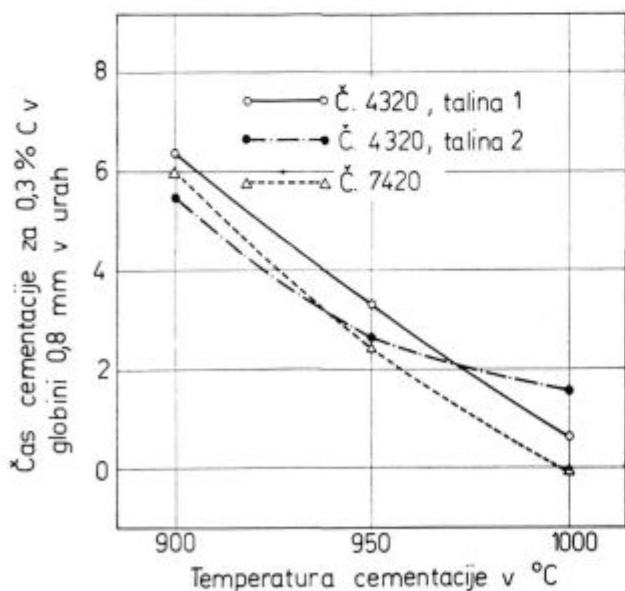
Tudi v standardni cementaciji niso bistvene razlike med talinami, razen pri 1000°C. Kljub temu smo vzeli poprečja, da smo lahko skupaj cementirali preskušance za poznejše mehanske preiskave.

**Površinske količine ogljika:** Za površinsko količino ogljika smo vzeli poprečno količino ogljika v 0,1 mm debeli površinski plasti ali približno količino ogljika v globini 0,05 mm. Rezultati so raz-



Slika 5

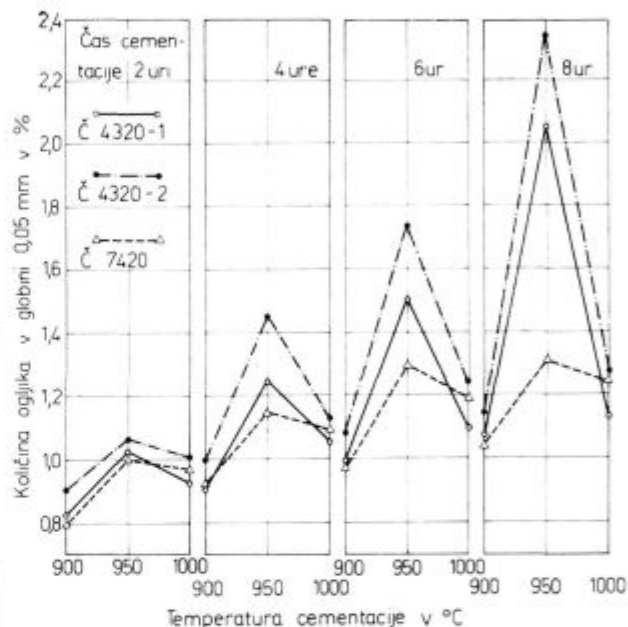
Količina ogljika v cementirani plasti po različnih temperaturah in časih cementiranja in globina cementacije v odvisnosti od časa cementiranja za jeklo Č. 7420



Slika 6

Standardna cementacija v odvisnosti od temperature

vidni iz diagramov na slikah 3, 4 in 5 ter iz diagrama na sliki 7. Pri krom-manganovem jeklu Č. 4320 opazimo izredno velike površinske količine ogljika, posebno po cementaciji na 950°C. Znano je, da tvori krom teže raztopne karbide, ki so do temperatur okoli 950°C še izločeni iz trdne raztopine. Domnevamo, da so odločilni činitelji za površinsko količino ogljika jakost adsorpcije, topnost karbidov in hitrost difundiranja ogljika v notranjosti. Pri temperaturah okoli 950°C prevladuje adsorpcija ob še nepopolni topnosti karbidov, zaradi česar se kopiči ogljik na površini. Nad 950°C pa začne prevladovati povečana difuzijska hitrost ogljika ob povečani ali popolni topnosti karbidov. Krivulje za ogljik po cementacijah na 1000°C na slikah 3 in 4 kažejo pri daljših časih (4, 6 in 8 ur) težnjo k položnosti tik pod površino, kar pomeni, da je odvajanje ogljika v notranjost večje od adsorpcije na površini.



Slika 7

Površinske količine ogljika v odvisnosti od temperature in časa cementiranja

Površinske količine ogljika so na prvi pogled zelo velike. Vendar so pomembne le tiste površinske količine ogljika, ki jih dobimo po standardnih cementacijah na 900, 950 in 1000°C. Te so navedene v tabeli 3.

TABELA 3 — Površinske količine ogljika po standardnih cementacijah

	Površinska količina ogljika v % po standardni cementaciji na:		
	900°C	950°C	1000°C
Č. 4320, talina 1	1,0	1,15	0,85
Č. 4320, talina 2	1,08	1,25	0,85
Č. 7420	0,98	1,07	0,85

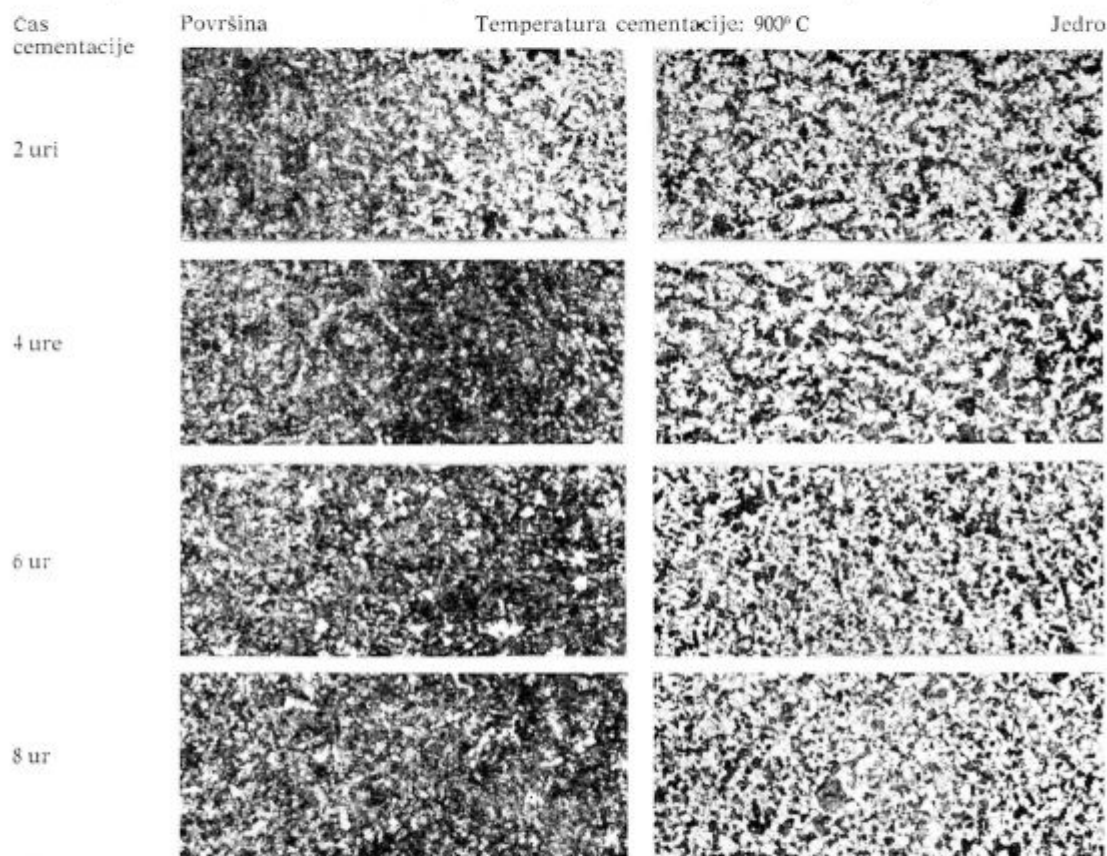
Opomba: Za standardno cementacijo pri 1000° C, ko je potreben čas le 1 ura, smo površinsko količino ogljika interpolirali iz krivulj.

Če upoštevamo večkrat potrjeno pravilo, da naj površinska količina ogljika ne preseže 0,9 ‰, so količine pri 900 in 950° C res nekoliko prevelike. Pravilo se opira na neugodni vpliv neraztopljenih ali celo mrežasto oblikovanih karbidov na mehanske lastnosti kaljene plasti. Ta pojav je najbolj izrazit, če kalimo cementirano jeklo iz temperature, ki je za cementirano plast optimalna. Če pa kalimo jeklo direktno iz cementacijskih temperatur nad 900° C, pri katerih se karbidi ne izločajo, ali pa le malo, ne more škoditi nekoliko povečana

površinska količina ogljika. Pri cementacijskih temperaturah nad 950° C pa pridemo v območje temperatur, ki dajo po standardni cementaciji optimalno površinsko količino ogljika.

### Metalografske preiskave

Popolno metalografsko preiskavo vseh cementiranih vzorcev smo opravili za jeklo Č. 7420 (slike 8, 9 in 10). Zrnatost cementirane plasti postaja pri višjih temperaturah cementiranja le malo grobejša. V strukturah jedra pa opazimo pri višjih cementacijskih temperaturah in daljših časih rast kristalnih zrn. Rastejo le posamezna zrna, ki se



Slika 8 Strukture površine in jedra po cementaciji na 900° C za jeklo Č. 7420

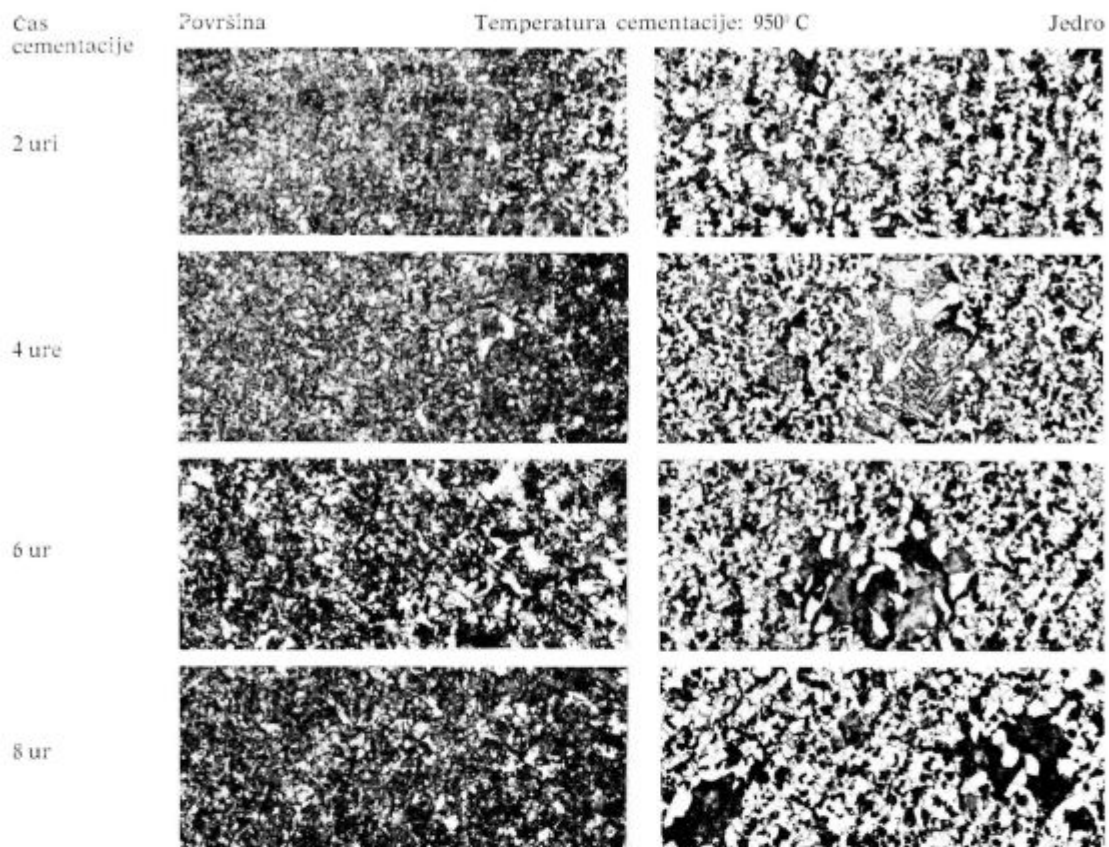
pri ohlajevanju transformirajo bainitsko. Popolna grobozrnatost ne nastane niti po 8-urni cementaciji na 1000° C. Najpomembnejša je pa seveda primerjava med strukturami po standardni cementaciji pri različnih temperaturah. Po 6 urah cementiranja na 900° C je struktura normalno drobnozrnata, po 3 urah na 950° C prav tako (še le po 4 urah opazimo prve pojave grobozrnatosti), po 1 uri cementiranja na 1000° C pa je rast zrn verjetno tudi še le v začetni fazi — na sliki 10 je metalografska podoba strukture po 2 urah cementiranja in vidimo le malo grobejših zrn. Lahko ugotovimo, da je jeklo Č. 7420 zelo odporno proti rasti kristalnih zrn in zato primerno za visokotemperaturno cementacijo do 1000° C.

### Sklepi

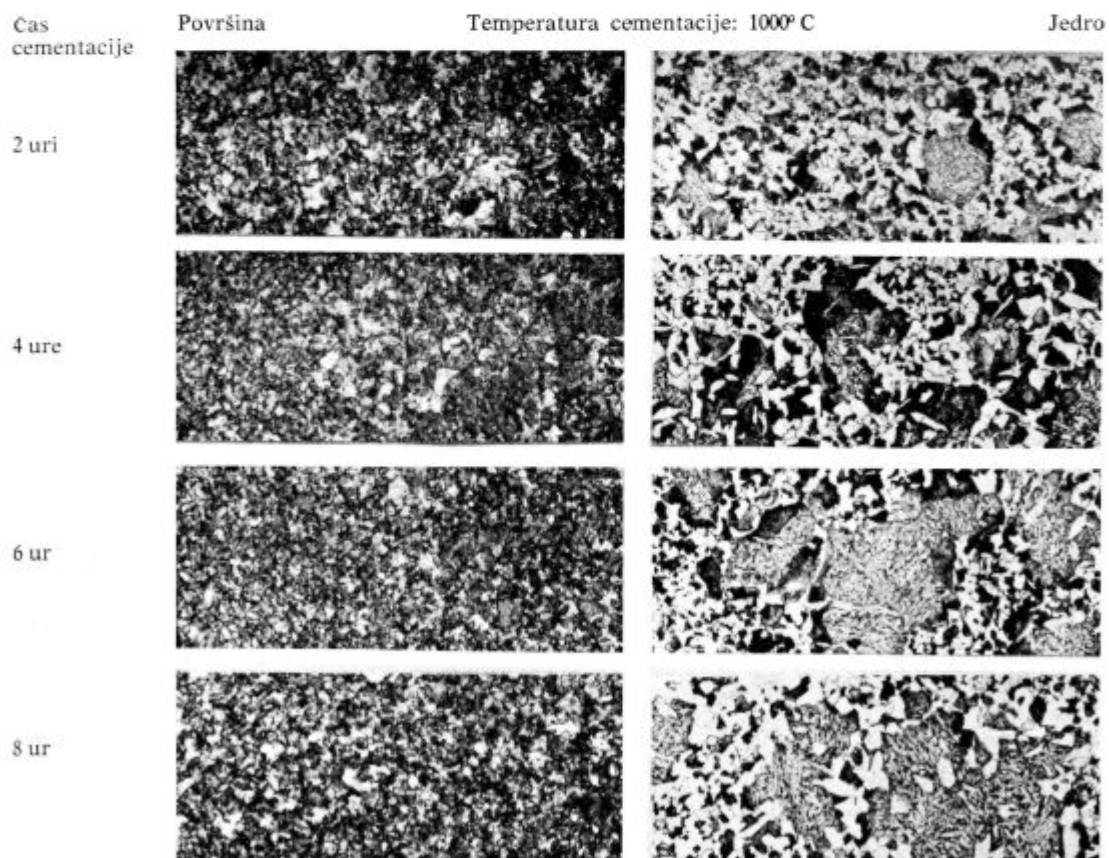
Z dvema talinama jekla Č. 4320 in eno talino jekla Č. 7420 smo izvršili vrsto preiskav visokotemperaturne cementacije. Rezultati so sledeči:

Hitrost cementiranja se od 0,085 mm/h pri 900° C poveča na 0,166 mm/h pri 1000° C. Z upoštevanjem cementiranja med segrevanjem vzorcev dosežemo standardno cementacijo (0,3 ‰ C v globini 0,8 mm).

- pri 900° C po 6 urah cementiranja,
- pri 950° C po 3 urah cementiranja in
- pri 1000° C po 1 uri cementiranja.



Slika 9 Strukture površine in jedra po cementaciji na 950° C za jeklo Č. 7420



Slika 10 Strukture površine in jedra po cementaciji na 1000° C za jeklo Č. 7420

Kako dolgo bo trajala celotna toplotna obdelava (segrevanje in cementiranje) pa je odvisno tudi od vrste peči oziroma od tehnologije. Nedvomno bo najuspešnejša in najbolj gospodarna visokotemperaturna cementacija takrat, ko je segrevanje na temperaturo čim krajše in ko želimo velike cementirane globine.

Površinska količina ogljika je največja po cementaciji na 950° C, posebno pri kromovem jeklu Č. 4320. Vendar po standardni cementaciji tudi po tej temperaturi ne preseže 1,25 % C. V tem pogledu je najugodnejša temperatura 1000° C, pri kateri dobimo na površini po standardni cementaciji 0,85 % C. Upoštevati je treba, da smo vršili preskuse z nespremenjeno plinsko mešanico, ki so-

razmerno ostro cementira. Za industrijsko proizvodnjo so vsekakor priporočljivi plinski izviri z možnostjo spreminjanja cementacijske aktivnosti plina.

Jeklo Č. 7420 ne kaže bistvenega povečanja kristalnih zrn po standardni cementaciji pri višjih temperaturah.

#### Literatura:

1. C. ALBRECHT: Salzbadkohlung bei extrem hohem Temperaturen, HTM, 16 (1961), zv. 1
2. B. FINNERN: Vergleich der Dauerfestigkeit und Massänderung nach Aufkohlen bei 930 und 980° C. HTM, 17 (1962), zv. 1

## Tekoča kalilna sredstva, opis in kontrola

V članku je iz literature zbran pregled o lastnostih tekočih ohlajevalnih sredstev (voda, raztopine in olja) s stališča ohlajevalnih sposobnosti in uporabnosti. Podana je kritična ocena posameznih skupin in napotki za orientacijo pri izbiri teh sredstev za toplotno obdelavo jeklenih izdelkov. Pri tem so upoštevani najnovejši izsledki pri preiskavah z modernimi metodami. Opisane oziroma našteje so tudi vse metode preizkušanja tekočih sredstev, predvsem kalilnih olj tako termične, metalurške, tehnološke in fizikalno-kemijske metode.

### Uvod

Jeklene izdelke ohlajamo zelo različno, pač odvisno od tega, kaj hočemo pri tem doseči. Da bi jekleni izdelek kalili, ga iz kalilne temperature primerno hitro ohlajamo; ohlajamo ga s hitrostjo, ki je enaka ali večja od kritične ohlajevalne hitrosti. Ker pa je kritična ohlajevalna hitrost odvisna od sestave oz. legiranosti jekla, moramo za kaljenje imeti na razpolago ohlajevalna sredstva z različno ohlajevalno sposobnostjo. Pri tem moramo seveda upoštevati, da pri kaljenju jeklo ohlajamo tako hitro, kot je potrebno, torej ne z veliko večjo hitrostjo, kot je njegova kritična ohlajevalna hitrost.

Enakomerno kaljenje dosežemo le tedaj, ko sta izpolnjena naslednja dva pogoja<sup>1</sup>:

1. točno držanje kalilne temperature in časa za popolno avstenitizacijo in

2. točno držanje temperature in ohlajevalne sposobnosti kalilnega sredstva.

Ta dva pogoja sta odločilna pri vsakem kaljenju. Prvemumu pogoju je možno ugoditi le s primerno dobro pečjo in regulacijskimi napravami. Težje je ugoditi drugemu pogoju. Ohlajevalna sposobnost se spremeni ob veliki obremenitvi tekočine, ko naraste temperatura tekočine, ali npr. z donšanjem kalilnih soli v ohlajevalno kopel. Tu je potrebno še poudariti, da ni jasnih predstav o vplivu materiala in dimenzij kosa na ohlajevalno sposobnost sredstva.

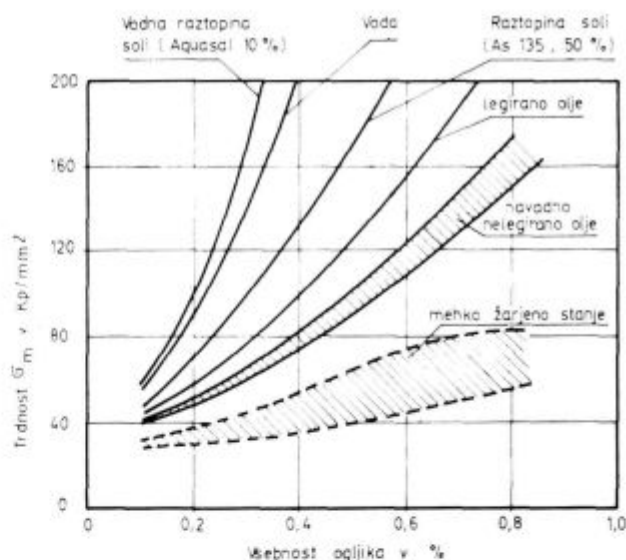
### TEKOČA OHLAJEVALNA SREDSTVA

Kalilna sredstva delimo po njihovem vrelišču. Temperaturno območje vrelišča pa se lahko nahaja<sup>2</sup> npr.:

- nad kalilno temperaturo jekla (solne in kovinske kopeli)
- pod temperaturo okolja (zrak, dušik) ali
- kalilno sredstvo vre med samim kaljenjem (voda, kalilna olja).

Ohlajevalna sredstva lahko razvrstimo po njihovi ohlajevalni sposobnosti. Kvalitativno se tako lahko razporedijo **po doseženih mehanskih lastnostih**, npr. po razrznici trdnosti. Tako razvrstitev ohlajevalnih sredstev prikazuje slika 1. Vrednosti so dobljene takole:

valjasti vzorci jekla so kaljeni v posameznih sredstvih; nato je tem vzorcem določena razrznica trdnost. Vzorci so izdelani iz jekla z različno vsebnostjo ogljika.<sup>1</sup>



Slika 1:

Trdnost C-jekel, odvisna od ohlajevalnih sredstev

Ohlajevalna sredstva lahko razvrstimo tudi z metodo srebrne krogle (ki je opisana v poglavju Ohlajevalna sredstva), pri čemer iz ohlajevalnih krivulj za posamezna sredstva določimo ohlajevalno sposobnost v kritičnih območjih ohlajanja (npr. v perlitnem območju). Naslednja tabela prikazuje maksimalno ohlajevalno hitrost v °C/s za posamezna sredstva:



Ohlajevalno sredstvo pri 20° C	Maksimalna hitrost ohlajanja v° C/s	V temperat. območju ° C
Solne raztopine (ca. 10 ‰)	2000 — 2700	500 — 600
Voda	1400 — 1700	300 — 400
Solne raztopine (ca. 50 ‰)	700 — 1000	400 — 700
Legirana olja	350 — 400	400 — 600
Topla kopel (ca. 200° C)	200 — 300	650 — 750
Navadna olja	150 — 300	450 — 550

Kvantitativno lahko ohlajevalna sredstva razvrstimo po **Grossmannovem faktorju** ohlajevalne intenzivnosti H. Naslednja tabela po Grossmannu podaja te H-vrednosti za mirno in gibajočo se kopel.<sup>1</sup> V tabeli so navedene tudi priporočljive optimalne temperature. Metoda določanja H-vrednosti je opisana v poglavju Intenzivnost ohlajanja.

Ohlajevalno sredstvo	H (svetel kos), mirna kopel pri temperaturi 20° C 80° C		H pri 20° C, zelo močno mešanje	Primerno temperaturno območje kopeli
Vodne raztopine soli (ca. 10 ‰)	1,8	2,2	7,5	do 70° C
Voda	1,0	0,07 (pri 75° C)	3—6	pod 70° C
Legirana olja za kaljenje	0,45	0,49	ocenejeno 1—1,5	do 100° C v posameznih primerih višje
Navadna kalilna olja	0,24	0,33	0,6—0,8	do 130° C glede na viskoznost
Topla solna kopel	pri 200° C sveža ca. 10 ‰ zamazana		0,4 0,2	

Iz tabele so možne naslednje ugotovitve:

1. Ohlajevalna intenzivnost H je največja za 10 ‰ solne raztopine, prav tako tudi 10 ‰ natrijev lug. Ohlajevalna intenzivnost je konstantna do približno 50° C, močneje pade šele pri temperaturi nad 85° C. Zato se kot primerno temperaturno območje predlaga do maksimalno 70° C.

2. Pri kaljenju v čisti vodi naj temperatura vode po možnosti ne prekorači 20° C. Nad to temperaturo ohlajevalna intenzivnost vode zelo hitro pada. Izogibati se moramo kaljenju v topli ali celo vroči vodi.

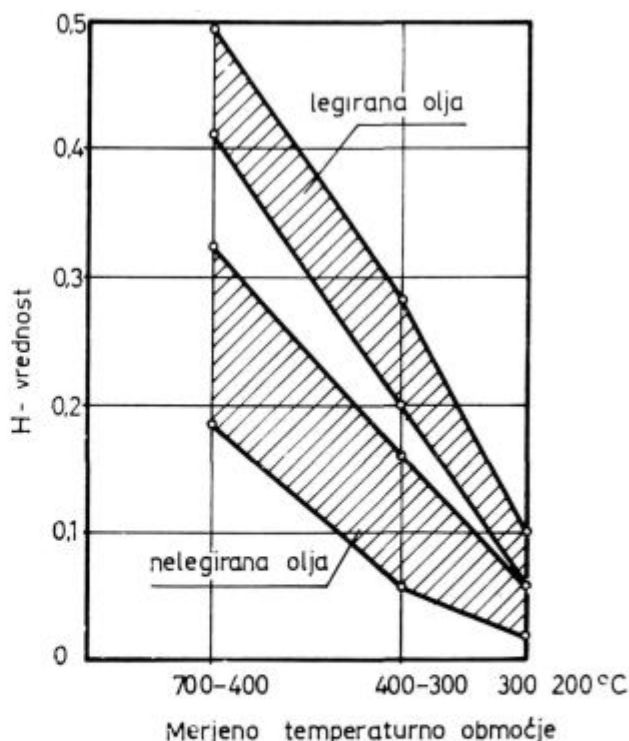
3. Legirana olja imajo zaradi dodatkov posebno visoko ohlajevalno intenzivnost. Stremi se za tem, da bi izdelovali olje z ohlajevalno intenzivnostjo 0,5 pri ugodni temperaturi.

4. Pri kaljenju v olju se s povišano temperaturo poviša ohlajevalna intenzivnost H do optima. Legirana olja imajo bistveno višje vrednosti, z mešanjem pa se te vrednosti še povečajo. Priporoča se, da je ob začetku kaljenja temperatura olja vsakokrat približno 30° C nižja, kot je za posamezno olje njegov optimum, ker med kaljenjem temperatura olja naraste zaradi toplote, ki se v olje prinese z vročimi kosi.

5. Ohlajevalna intenzivnost toplih solnih kopelel ustreza približno vrednostim za navadna olja, se pa često še zniža med uporabo z donašanjem tujih soli.

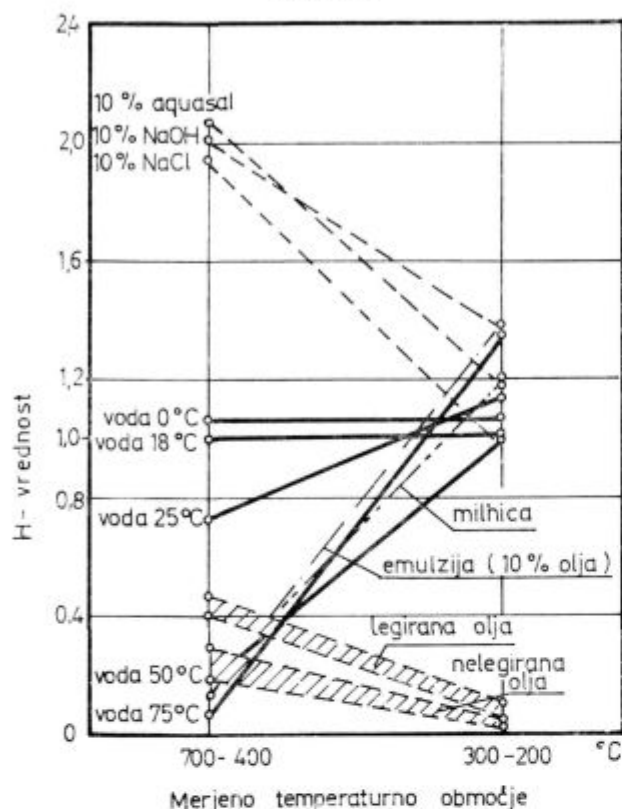
Potrebno je poudariti, da H-vrednosti niso enake pri vseh temperaturah ohlajanja. Kalilna olja imajo pri nižjih temperaturnih območjih nižje H-vrednosti. Slika 2 to jasno predstavlja.<sup>1</sup> Tu se tudi lepo ločijo legirana olja od navadnih nelegiranih.

Slika 2



Tu je potrebno opozoriti na prednost, ki jo imajo olja, t. j., da je ohlajevalna intenzivnost H v temperaturnem območju tvorbe perlita relativno visoka in se zniža s padcem temperature. Za obe

Slika 3



Sl. 2 in 3:

H-vrednosti uporabnih ohlajevalnih sredstev

vrsti olj je v martenzitnem območju nižja od 0,1. Iz tega sledi, da je v območju tvorbe martenzita precej manjša intenzivnost ohlajanja in s tem tudi toplotne napetosti. S tem je tudi manjša nevarnost za deformacije in razpoke.

Če upoštevamo, da je faktor ohlajevalne intenzivnosti vode pri 18°C 1, potem so za ostala tekoča ohlajevalna sredstva te vrednosti predstavljene na naslednji sliki 3 za dve temperaturni območji.<sup>1</sup> Razlikujemo v bistvu **tri skupine tekočih ohlajevalnih sredstev** za kaljenje<sup>1</sup>:

a) Skupina raztopin soli v vodi z vsebnostjo soli 10–15%. Ohlajevalna intenzivnost te skupine je v odločilnem območju temperatur 700 do 500°C zelo velika, 2 in več. Razpok je manj kot pri kaljenju v vodi, ker se parni plašč tvori, a ohlajevalna intenzivnost v območju tvorbe martenzita je manjša.

b) Ohlajevalna intenzivnost vode je v posameznih temperaturnih območjih nenavadna in celo neugodna. Ravno ta pregled H-vrednosti pojasnju-

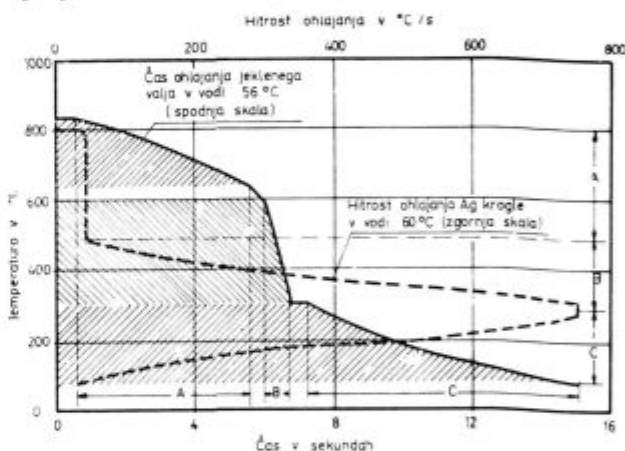
je, zakaj so mehka mesta, lisavost in razpoke posledica kaljenja v vodi. Čim višja je temperatura vode, tem manjša je H-vrednost v temperaturnem območju 700–400°C (precej pod 1), a v območju tvorbe martenzita je še vedno 1, t. j. višja. Pri višji temperaturi vode se tvori obstojnejši parni plašč. Ohlajevalna hitrost naraste prav v nevarnem območju, t. j. v območju tvorbe martenzita.

To je potrebno posebej poudariti pri emulziji vode z 10% olja in pri milnici, kjer je stanje še bolj neugodno. (Zato je zelo nevarna navada kalilcev, da si po končanem delu z milom umijejo roke v kalilni vodi. Taka voda je pravi strup za kaljenje.)

c) Tretjo skupino predstavljajo kalilna olja, kjer se med seboj jasno ločijo navadna nelegirana in legirana (ostra) olja.

### Pojavi na površini jekla med kaljenjem

Ob potopitvi vročega kosa v tekoče ohlajevalno sredstvo se zvrstijo tri ločene faze druga za drugo, kot kaže ohlajevalna krivulja na sliki 4 za jedro jeklenega valja manjšega premera pri kaljenju v mirni vodi (56°C).<sup>1</sup>



Sl. 4:

Primerjava krivulj: ohlajanja (jekleni valj) in ohlajevalnih hitrosti (Ag krogla)

V temperaturnem območju od 800 do 600°C leži faza A, t. j. **faza tvorbe parnega plašča**. Vroč kos je ovit s parnim plaščem in s tem izoliran. Zato je ohlajevalna hitrost tedaj relativno nizka. Ta pojav si lahko razlagamo tudi s plesanjem vodne kapljice na vroči plošči.

V temperaturnem območju med 600 in 300°C nastopa faza B, takoimenovana **faza kuhanja**, ko se razdre parni plašč in na jekleno površino doteka voda iz okolice. Ne nastaja več stabilni parni plašč, ampak na novo stvorjeni parni mehurčki sproti odhajajo od kosa; tekočina kuha. Za to fazo je značilno močno odvajanje toplote in to tem močneje, čim večja je uparjalna toplota tekočine.

V tretji fazi C, v temperaturnem območju pod 300° C, je temperatura kosa padla že tako nizko, da se parni mehurčki ne morejo več tvoriti. Ohlajanje se nadaljuje le še z **odvajanjem toplote** in s konvekcijo. Hitrost ohlajanja je tedaj že razmeroma zelo nizka in neprekinjeno počasi pada.

Na tej sliki 4 je vnesena tudi krivulja ohlajevalnih hitrosti vode med celotnim ohlajanjem. Ta krivulja je narejena v Max-Planckovem inštitutu s srebrno kroglo. Ujemanje vse treh faz ohlajanja ni ravno točno, vendar je zadovoljivo.

Razvoj vseh teh treh faz ohlajanja je možno prav lepo zasledovati med kaljenjem v čistem olju (ali tudi vodi) v stekleni posodi<sup>4</sup>. Pri tem je možno jasno ločiti konec faze A, ko se lep, gladek in kompakten parni plašč nenadoma začne drobiti in se mehurčki razširjajo v okolico tekočine in tam zginevajo. Ko se na površini jekla prenehajo razvijati parni mehurčki oziroma ko jih v tekočini ni več, je konec faze B in tekočina samo še struji ob površini kosa. Končno je olje čedalje bolj mirno.

Če olje ni pretemno, se proces lahko filma s kamero večje hitrosti. Seveda je to možno izvesti tudi pri ohlajanju v vodi.

Idealno kalilno sredstvo naj ima veliko hitrost ohlajanja v fazi odvajanja parnega plašča in zmernejšo hitrost v končnem temperaturnem območju.<sup>5</sup>

Voda in vodne raztopine anorganskih soli imajo največjo ohlajevalno sposobnost. Ker se ta visoka ohlajevalna hitrost obdrži še do nizkih temperatur, se uporaba vodnega kaljenja omejuje na preproste kose in površinsko kaljenje jeklenih izdelkov.

Pri navadnem olju je parni plašč obstojen dalj časa kot pri vodi.

Ostra kalilna olja imajo večje ohlajevalne hitrosti, bližje vodi in večje kot navadna olja. Imajo pa manj stabilen parni plašč kot navadno olje.

## Voda

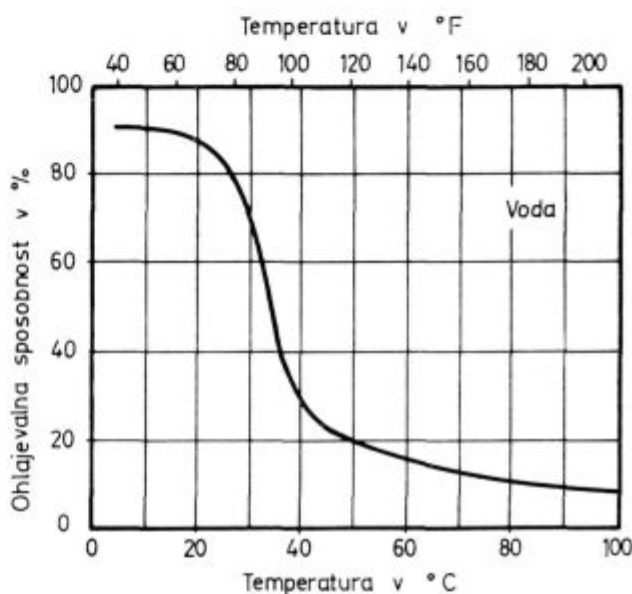
Kot kalilno sredstvo doseže navadna voda maksimalno ohlajevalno hitrost, ki je v tekočinah dosegljiva. Njena prednost je ta, da ni draga in je takoj uporabna, je lahko dostopna brez problemov okoli onesnaženja ali nevarnosti za zdravje. Voda je učinkovito sredstvo za luščenje škaje z jeklenih izdelkov, ki se kalijo iz peči, v katerih se ne uporablja varovalna atmosfera.<sup>5</sup>

Ena od slabih strani navadne vode kot kalilnega sredstva je, da hitro ohlaja v majhnem temperaturnem območju, v katerem se rade pojavljajo deformacije in razpoke. Zato je uporaba vode vedno omejena na kaljenje enostavnih, simetričnih kosov iz plitvo kaljivega jekla (ogljikova in nizko legirana jekla). Druga slaba stran pri uporabi navadne vode je ta, da se faza A (tvorba parnega plašča) (slika 4) lahko precej podaljša. To podaljšanje je odvisno od stopnje komplicira-

nosti oblike kosa, ki ga kalimo, in od temperature vode za kaljenje. Povzroči neenakomerno trdoto in neugodno razporeditev napetosti, ki lahko povzroče deformacije in razpoke. V vodi kaljeni jekleni deli lahko zarjavijo, če jih takoj ne zaščitimo z zaščitnim sredstvom.

Da bi pri kaljenju v vodi lahko dobili rezultate, ki jih je možno ponoviti, moramo kontrolirati temperaturo, mešanje in onesnaženje.

Temperatura vode naj bo okoli 15 do 25° C. Tedaj je omogočeno dosegati enotne ohlajevalne sposobnosti in enakomerne rezultate. Kot se vidi na sliki 5, površinska ohlajevalna sposobnost vode strmo pade, ko naraste temperatura vode. Vroča voda ima nizko ohlajevalno sposobnost, ker se bližamo vrelišču in ohlajevalni učinek je podoben učinku vodne pare (glej sliko 3).



Sl. 5:

Približna ohlajevalna sposobnost vode pri zmernem mešanju, odvisno od njene temperature (ASM)

Mešanje je važno pri kaljenju v vodi, ker odstranjuje parne mehurčke od kosa in k njemu usmerja hladnejšo vodo. Meša se lahko z mehanskim vijakom, cirkulacijsko črpalko, s kontroliranim pretokom ali s kombinacijo teh metod.

Onečiščenje kalilne vode z raztopljenimi solmi ugodno poveča ohlajevalno sposobnost, ker soli močno zmanjšajo obstojnost parnega plašča. Nasprotno pa onesnaženje z raznimi mili, algami, blatom in emulzijami zmanjša ohlajevalno sposobnost z zadrževanjem parnega plašča, kar preprečuje dostop hladilni vodi do površine jekla.

Raztopljene soli, ki so nanesene iz aktivnih solnih kopeli v kalilni bazen, lahko motijo zaprti črpalni sistem ali zmanjšajo koristni volumen vode v kalilnem bazenu. Priporoča se periodično čiščenje ali zamenjava vode.

## Slana voda

Kot kalilno sredstvo je slana voda vodna raztopina, ki vsebuje različne odstotke soli (natrijev klorid ali kalcijev klorid) skupno s posebnimi dodatki in antikorozijskimi inhibitorji.<sup>5</sup> Seveda pa lahko taka kalilna voda vsebuje namesto soli druge anorganske spojine.

Slana voda ima pred navadno vodo in oljem naslednje prednosti:<sup>5</sup>

— ohlajevalna sposobnost je večja kot v vodi pri enakem mešanju,

— temperatura je manj kritična kot pri navadni vodi, zato ni potrebna tako ostra kontrola,

— zaradi manjše stabilnosti parnega plašča se manj pojavljajo mehka mesta in lisavost,

— deformacije so manj resne kot pri kaljenju v vodi,

— hlajenje slane vode ni tako nujno kot pri navadni vodi,

— medtem ko je pri bazenih s kalilnim oljem in vodo običajno potreben vijak za mešanje, pri slani vodi ni nujen.

**Slabosti kaljenja v slani vodi** običajno ne preprečijo njene uporabe, ker je kaljenje v slani vodi uporabno samo tam, kjer kaljenje v olju ali navadni vodi ne daje želenih rezultatov. Nekatere od slabosti so:<sup>5</sup>

— Korozijska narava slane vode zahteva, da so kalilni bazen, črpalka, prenosni mehanizmi in ostale naprave, ki so v stalnem dotiku s slano vodo, zaščiteni pred korozijo ali izdelani iz korozijsko obstojnih kovin (bakrene zlitine ali nerjavno jeklo).

— Potrebne so posebne naprave za odvajanje korozijskih par, ki nastajajo nad slano vodo, da bi zaščitili sosednje stroje in precizne naprave.

— Stroški za slano vodo so višji kot za navadno vodo, posebno za dodatke in korozijske inhibitorje.

— Stroški narastejo tudi z laboratorijsko kontrolo raztopin.

— Večja je nevarnost pred zastrupitvijo in požarom, posebno če se uporabijo kaustične mešanice.

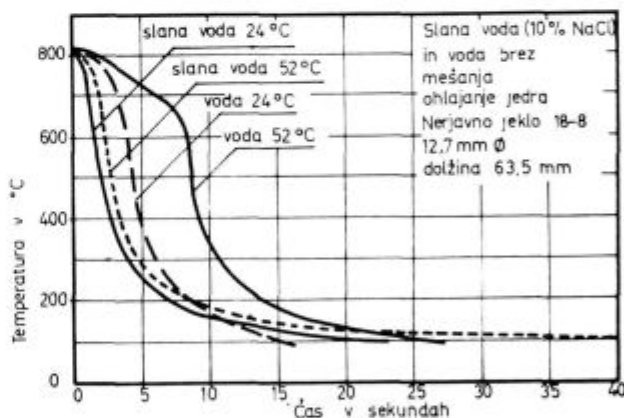
Ohlajevalna sposobnost slane vode je zelo odvisna od koncentracija anorganske spojine v vodi.

Jeklena valjasta proba ( $\varnothing$  12,7 mm, dolžina 50,8 mm) se v raztopini s 5 % (utežnih) NaOH pri 20° C od 870 do 200° C ohladi v 0,31 sekunde. Pri istih pogojih se v raztopini s 5 % NaCl ohladi v 0,48 sekunde, v navadni vodi pa v 1,2 sekunde. NaCl je cenejši, delo z njim je varnejše in lažje kot z NaOH, zato se mu daje prednost. Raztopina CaCl<sub>2</sub> (s 5—20 % ut.) doseže podobno ohlajevalno sposobnost kot NaCl. V naslednji tabeli so podane hitrosti ohlajanja od 875 do 727° C za nekatere vodne raztopine soli, če je temperatura raztopine 20° C; uporabljen je jeklen vzorec z 0,95 % C, dimenzijami  $\varnothing$  12,7 mm in dolžino 50,8 mm.<sup>5</sup>

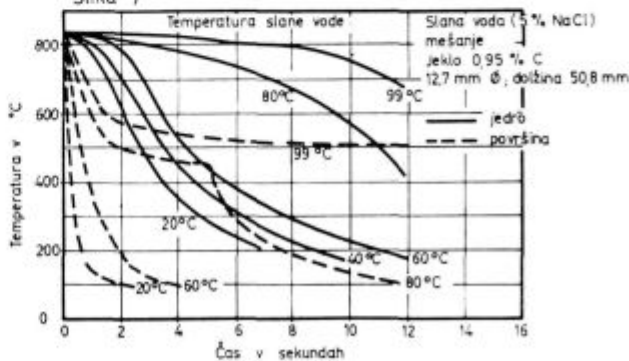
Kemikalija	Utežni %	Ohlajanje jedra v °C/sekundo
Voda		100 do 120
NaOH	2,5	197
NaOH	5,0	202
NaOH	11,5	202
NaOH	16,5	207
NaCl	5,0	171
NaCl	10,0	197
CaCl <sub>2</sub>	5,0	171
CaCl <sub>2</sub>	10,0	193
CaCl <sub>2</sub>	20,0	171
NaCO <sub>3</sub>	10,0	171
HCl	5,0	152
HCl	12,5	152
HCl	20,0	97
HCl	36,0	pod 51
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	5 do 20	143 do 152
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	30,0	93
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	95,0	77

Ugotovljeno je, da je pri kaljenju od vseh slanah vod najučinkovitejša raztopina z 9 % (ut.) NaCl, vendar se v nekaterih kalilnicah uporablja

Slika 6



Slika 7



Sl. 6 in 7:

Ohlajevalne krivulje za slano vodo in vodo

tudi raztopina z manj kot 4% NaCl. Koncentracije nad 10% NaCl se redko uporabljajo, ker večje koncentracije NaCl znižajo stopnjo ohlajanja in povzročajo mehka mesta in razpoke.

Majhne spremembe delovne temperature ne vplivajo kritično na ohlajevalno sposobnost vodnih raztopin soli. Čeprav so take raztopine uporabne tudi pri temperaturah blizu vrelišča vode, je ugotovljena maksimalna ohlajevalna sposobnost pri temperaturi okoli 20°C. Ohlajevalne krivulje jedra, ki so prikazane na naslednji sliki 6, prikazujejo vpliv povišane temperature na ohlajevalno sposobnost vode v primerjavi s slano vodo (10% NaCl).<sup>5</sup> Slika 7 pa prikazuje vpliv temperature raztopine na potek ohlajevalnih krivulj za jedro in površino za ohlajanje v slani vodi s 5% NaCl. Ohlajevalna sposobnost znatno pojema, ko se temperatura raztopine približuje vrelišču vode.

Naslednja slika 8 prikazuje še enkrat vpliv temperature slane vode (5% NaCl) na njeno ohlajevalno sposobnost na površini in v jedru vzorca s premerom 12,7 mm in dolžino 50,8 mm, iz jekla z 0,95% C in na čas, ki je potreben za ohlajanje od 873 do 299°C.

Slano vodo moramo tudi vzdrževati, tako koncentracijo soli z redno kemijsko analizo in obnavljanjem kot tudi čistočo. Za kaljenje jeklenih kosov iz cianidnih kopeli se slane vode ne uporablja, ker obstaja nevarnost škropljenja zaradi eksplozije. Prenášanje kloridnih snovi je manj škodljivo za raztopino NaCl kot za kaustično raztopino.

Poleg vode in slanih vod se kot kalilne tekočine uporabljajo še **raztopine polivinilnega alkohola v vodi**. Uporablja pa se tedaj, ko kaljenje zahteva večjo ohlajevalno sposobnost kot najostreje olje, toda manjšo kot voda ali slana voda.<sup>5</sup> Temperatura, posebno pa koncentracija te raztopine, močno vpliva na ohlajevalne karakteristike.

### Kalilna olja

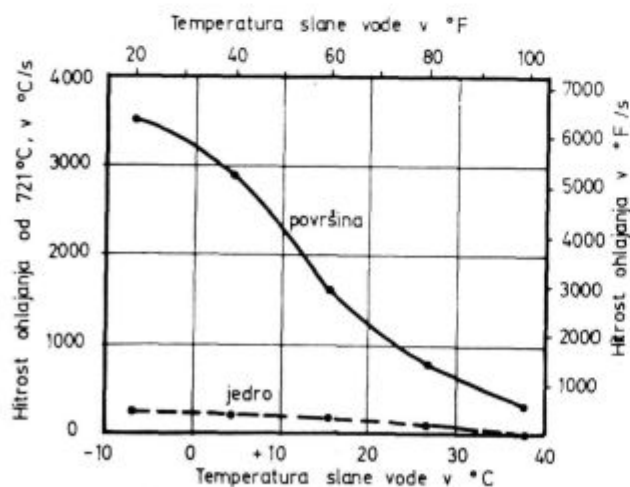
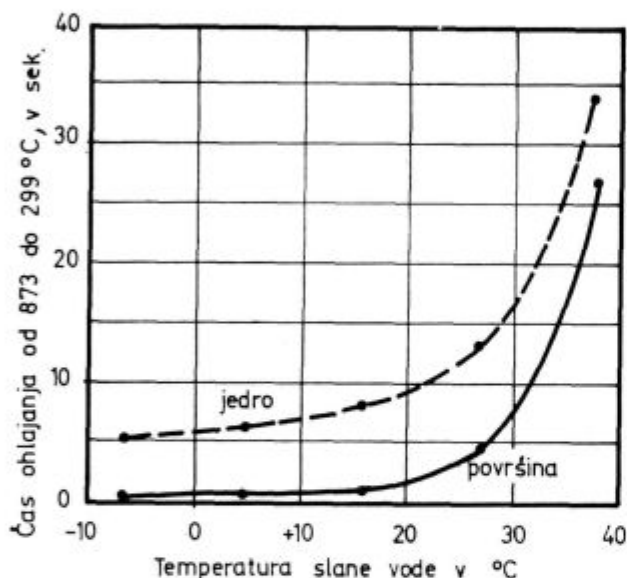
Kalilna olja lahko razdelimo v dva osnovna tipa: navadno olje in ostro legirano olje. Tretji tip pa je emulzija (voda — olje), ki je pa ne moremo razvrstiti po enakem sistemu. Posebnost so vroča olja za popušcanje.

Navadno kalilno olje je produkt frakcionirane destilacije surove nafte in nima nobenih dodatkov (aditivov). Ostro olje pa je manj viskozno in vsebuje dodatke, ki omogočajo, da olje ostreje kali.<sup>5</sup>

Kalilna olja imajo v prvi fazi kaljenja stabilnejši parni plašč in relativno nizko hitrost ohlajanja v končni fazi kaljenja. Parni plašč se lahko razbije šele z močnim mešanjem, čeprav je učinek mešanja olja sorazmerno majhen. Z različnimi dodatki se zmanjša trdnost parnega plašča.<sup>6</sup>

Olje ima v fazi kuhanja oziroma vrenja razmeroma visoko **ohlajevalno hitrost**, vendar dva do trikrat manjšo<sup>6</sup> od tiste, ki jo dobimo s kaljenjem v vodi. V končni fazi ohlajanja ima olje zelo nizko ohlajanja itle faktorji: specifična toplota, prevodnost ohlajanja.<sup>6</sup> V tej fazi regulirajo hitrost in temperatura. Specifična toplota olj je polovico manjša od vode, a prevodnost je približno četrtnina one, ki jo ima voda. Hitrost ohlajanja v tej fazi je v vodi desetkrat večja kot v olju. V tej fazi ima mešanje odločilen vpliv, veliko močnejši kot viskoznost (glej sliko 2).

Vpliv lastnosti različnih kalilnih olj na karakteristike ohlajanja ni popolnoma poznan, vendarle je gotovo naslednje. Vrelišča večine olj so tako visoka, da majhne spremembe temperature olja malo vplivajo na trdnost parnega plašča. To je nasprotno pri pogojih kaljenja v vodi, ki ima nižje vrelišče kot olje. Pogoji kaljenja v vodi so tembolj občutljivi, čim manjša je razlika med vreliščem in temperaturo vode za kaljenje. V drugi fazi se jeklo celo hitreje ohlaja, če je olje toplejše, ker nižja viskoznost omogoči hitrejšo odvajanje pare



Sl. 8:

Vpliv temperature na kaljenje v slani vodi (5% NaCl) Jeklo z 0,95% C 12,7 mm  $\varnothing$  dolžina 50,8 mm, mešanje

od jeklene površine. Vroče olje ima zelo nizko hitrost ohlajanja v tretji fazi, kar ugodno vpliva na zmanjšanje napetosti.<sup>6</sup>

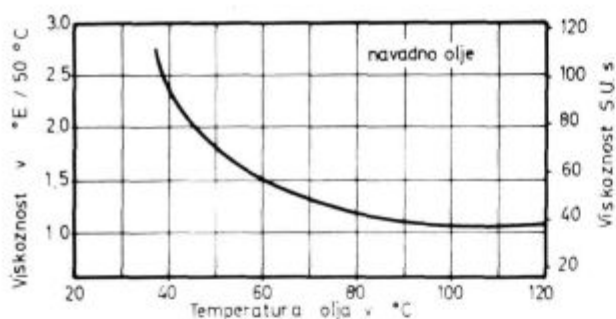
Ohlajevalna sposobnost narašča z naraščanjem gostote in naraščanjem vrelišča.

Ne glede na to, ali je olje navadno ali ostro, bi moralo biti obstojno proti razkroju, oksidaciji in ne bi smelo tvoriti usedlin. Olja se morajo izbirati po minimalni vrednosti vnetišča. Olja s prenizkim vnetiščem ne pridejo v poštev. Kolikor se temperaturo olja vzdržuje dovolj nizko, vnetišče ni najvažnejše.<sup>5</sup>

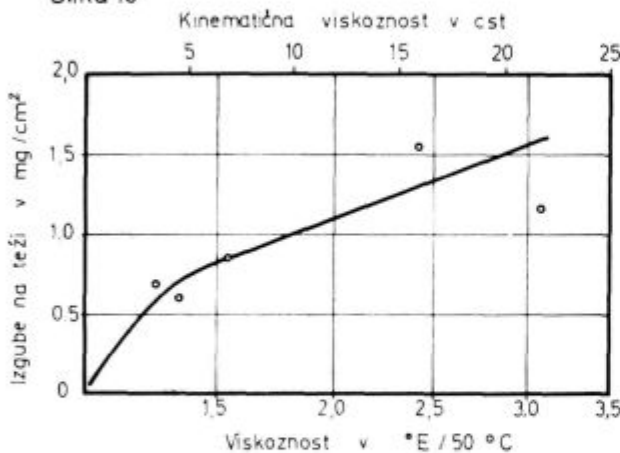
Ne glede na viskoznost se vsako olje do neke mere uparja, ko se vanj potopi vroče jeklo. Olje se vneme, dokler se jeklo popolnoma ne potopi, a uparjeno olje se kondenzira ob hladnem olju. Kalilno olje se ne vneme, če temperatura površine ne doseže gorišča.<sup>5</sup>

**Viskoznost** vpliva na ohlajevalne karakteristike. S povečanjem temperature se viskoznost rapidno zniža. To prikazuje slika 9. Čim manjša je viskoznost kalilnega olja, tem manjše so izgube olja z iznašanjem kaljenih izdelkov. Zato je važno

Slika 9



Slika 10



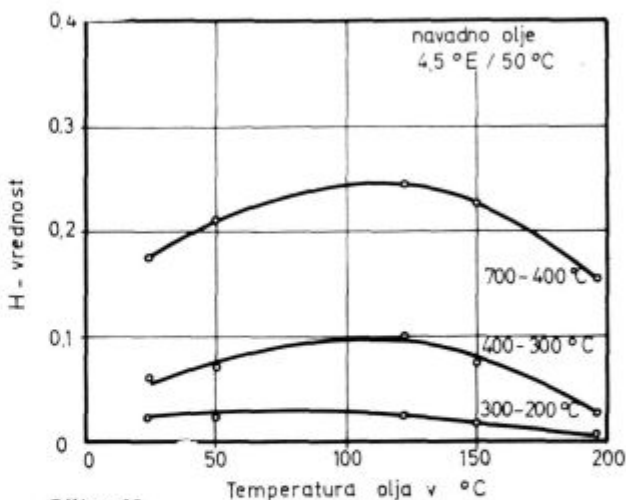
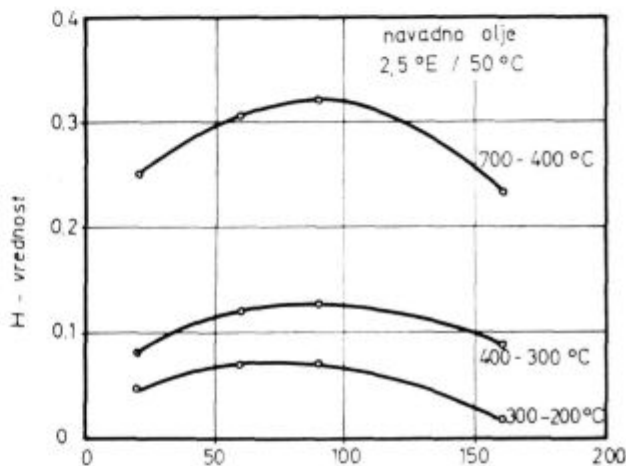
Sl. 9 in 10:

Vpliv temperature na viskoznost in vpliv viskoznosti na izgube olja

vzdrževanje primerne viskoznosti.<sup>5</sup> Iz bazena se s kosi iznese 3 do 8 kg olja na eno tono kaljenih ksoov. Seveda je to odvisno od temperature olja in velikosti kosov. Naslednja slika 10 prikazuje te izgube.<sup>2</sup> Ostra olja imajo v splošnem nižjo viskoznost kot navadna olja.<sup>5</sup>

**Optimalna temperatura** je odvisna od naslednjih faktorjev: vnetišče olja, zahteve čistosti, kontrola razkrajanja in obremenitev ter zahteve kaljenja. Maksimalna obratovalna temperatura se ravna po vnetišču olja. Za varno obratovanje kopeli se mora temperaturo kopeli vzdrževati najmanj 65<sup>o</sup> C pod vnetiščem olja. Z nizko obratovalno temperaturo pa preprečujemo oksidacijo in razkroj olja in omogočimo čisto kaljenje. Kaljenje kosov z veliko površino v razmerju s prostornino zahteva zaradi velike obremenitve olja precej nižjo obratovalno temperaturo.

Slika 11

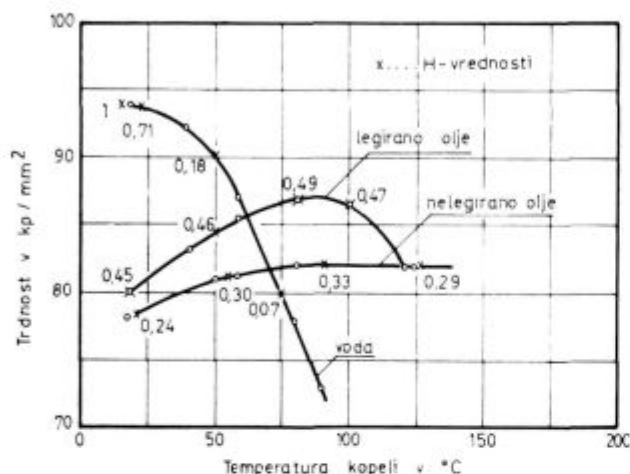


Slika 12

Sl. 11 in 12:

H-vrednosti kalilnih olj v odvisnosti od merjenega temperaturnega območja in temperature olja

Naslednja slika 11 prikazuje krivuljo faktorja ohlajevalne intenzivnosti v odvisnosti od temperature olja oz. optimalno temperaturo obratovanja olja z 2,5<sup>o</sup> E pri 50<sup>o</sup> C. Isto prikazuje tudi slika 12 za olje s 4,5<sup>o</sup> C pri 50<sup>o</sup> C.<sup>1</sup> Z višjo temperaturo se res zniža viskoznost, vendar se s tem tudi poveča nagnjenost k tvorbi parnih mehurčkov. Slika 13 prikazuje dosežene trdnosti jedra Č. 1530 (C-45) v odvisnosti od temperature za vodo, legirano olje in navadno olje. Ugotovljeno je, da se optimalne temperature, dobljene z ugotavljanjem faktorja H, ujemajo z onimi, ki so ugotovljene z določanjem trdnosti jedra.<sup>1</sup>



Sl. 13:

Trdnost jedra okroglih palic Č 1530 (C 45) v odvisnosti od odgovarjajočih H-vrednosti ohlajevalnega sredstva

**Onesnaženje olja** je navadno združeno z razkrojem, ta pa je posledica oksidacije ali neprimerne pečne atmosfere. Razkrajanje olja se kmalu opazi, ker se na kaljene kose useda blato (produkti razkroja). To usedanje je neprijetno, ker je blato težko odstraniti, a odloženo blato poslabša odvajanje toplote.<sup>5</sup> Z določevanjem vnetišča lahko odkrije mo obseg razkrajanja.

Za **selekcijo kalilnih olj** se v splošnem uporabljajo naslednji testi:<sup>6</sup> specifična teža, viskoznost, vnetišče, gorišče, koksni test, energija emulgiranja in število umiljenja. Specifična teža je povezana s specifično toploto, toplotno prevodnostjo, uparilno toploto; vsi faktorji skupaj pa določajo hitrost ohlajanja v zadnjih fazah.

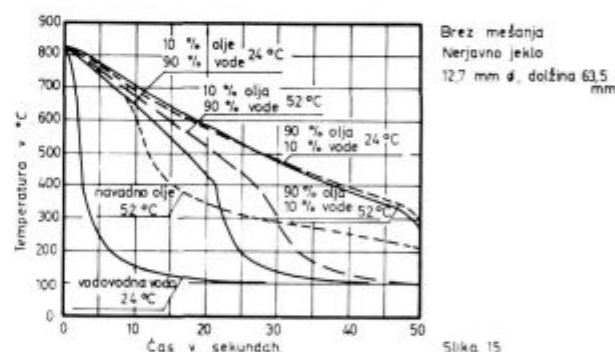
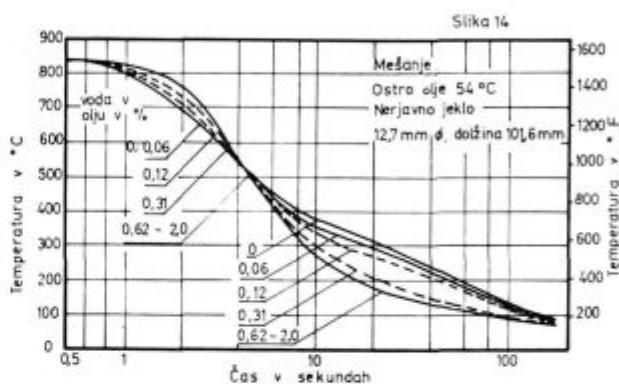
Zaželen je čimmanjši koksni ostanek, da bi bilo olje čimbolj stabilno. Število umiljenja pa je odvisno od tipa olja.

Dodatek mastnih olj (kot je repično) mineralnemu olju neznatno poveča ohlajevalno sposobnost, močno zmanjša stabilnost parne faze. Čisto repično olje ima večjo ohlajevalno sposobnost kot skoraj vsako mineralno olje, posebno pri nizkih temperaturah. To pomeni, da so možne kalilne razpoke.

Tu je potrebno poudariti, da se za kaljenje kov, ki so ogrevani v solni kopeli, sme uporabiti le čisto mineralno olje. Alkalijske solne kopeli povzročijo saponifikacijo olja in s tem hitro poslabšanje.

### Voda v kalilnem olju

Sliki 14 in 15 prikazujeta vpliv vode, ki se nahaja v olju, na potek ohlajanja. Krivulje so posnete z vzorcem premera 12,7 mm dolžine 101,6 oz. 63,5 mm iz nerjavečega jekla, brez mešanja in z njim. Pri vsebnosti vode pod 0,15 % se pospeši ohlajanje v začetni fazi tvorbe parnega plašča, pri vsebnosti okoli 0,15 % vode pa je parni plašč že obstojnejši. Pri višjih vsebnostih vode se intenziviranje ohla-



Sl. 14 in 15:

Vpliv vode v olju na ohlajanje

janja pomakne k nižjim temperaturam. Voda v olju popolnoma spremeni pogoje kaljenja v olju. Olje se peni tedaj, ko je v olju prisotna voda. Temperatura, pri kateri se prične olje peniti, je odvisna od fizikalnega stanja vode v olju, od temperature olja, od vrste olja. Večja količina vode v določenih delih oljnega bazena lahko povzroči eksplozijo zaradi nenadne tvorbe večjega volumna pare. Z močnejšo cirkulacijo takega olja se zmanjša nevarnost eksplozije.

Voda pride v olje lahko na več načinov:<sup>2</sup> vdre iz vodnega hladilnika ali pa se kondenzira na pokrovu bazena in teče v olje.

Vodo lahko odstranimo iz olja na več načinov:<sup>5</sup>  
 — dvignemo temperaturo olja do vrelišča vode (105—110° C),

— pustimo, da se umiri in jo na dnu spustimo iz bazena,

— olje centrifugiramo,

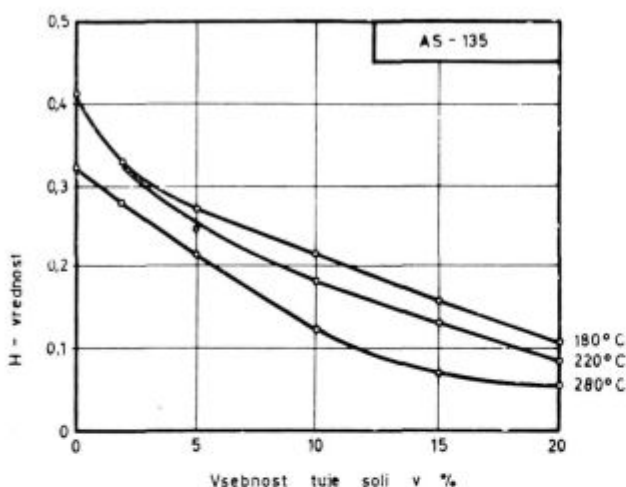
— olje filtriramo.

Filtrirana legirana olja se mora nato prekontrolirati na vsebnost dodatkov.

Prisotnost vode v emulzijah (olje—voda) zelo različno vpliva na ohlajevalne karakteristike. Kot je vidno na sliki 15, predstavljajo emulzije vode in olja najslabšo obliko vodnih in oljnih kalilnih sredstev. Emulzije z 10 % olja in 90 % vode zmanjšajo ohlajevalno intenzivnost pri višjih temperaturah (v primerjavi z navadnim oljem) v prvi fazi. Ohlajanje v naslednji fazi je v bistvu enako kot v vodi. V emulzijah z 90 % topljivega olja in z 10 % vode je ohlajevalna sposobnost slabša po celem ciklusu (v primerjavi z navadnim oljem).

### Tople kopeli

Houghtonova Mainhardtova naprava, ki je opisana v poglavju Intenzivnost ohlajanja, je pravzaprav konstruirana za določanje ohlajevalne intenzivnosti (H - vrednost) toplih solnih kopeli. Slika 16 jasno kaže vpliv tujih soli v soli AS 135 oziroma onesnaženje kopeli z donešeno kalilno in cementacijsko soljo (prenašanje s kaljenimi deli) na zmanjšanje ohlajevalne intenzivnosti. Onesnaženje povzroči močan padec H - vrednosti.<sup>1</sup>



Sl. 16:

H - vrednosti za toplo kopal AS 135 v odvisnosti od vsebnosti tuje soli in temperature kopeli

### Izbor kalilnih olj

Izbor olja za kaljenje naj slomi na izkušnjah in obsežnih sistematičnih raziskavah. Če izkušnje niso uporabne, se mora uporabiti eno ali več metod za preizkušanje. Najvažnejši kriterij za izbor kalilne-

ga olja je zagotovitev ohlajanja in kaljenja brez razpok. Ostale ocene so velikost deformacij, cena končnega izdelka in dosežena mikrostruktura, posebno v cementiranih jeklih.<sup>5</sup>

Če ima jeklo zadostno kaljivost, bo popolnoma kalilo v navadnem olju, tedaj ne bo potrebno uporabiti dražjega ostrejšega olja. Če pa ima jeklo tako nizko kaljivost, da ne moremo niti v vodi doseči zadovoljivih rezultatov, potem tudi z ostrim oljem ne bomo rešili problema. Med tema ekstremoma pa lahko veliko problemov ugodno rešimo z uporabo ostrega olja. Upoštevati pa moramo, da ostro legirano olje povzroča pri kaljenju več deformacij kot navadno olje.

Primeren izbor kalilnih olj lahko precej poceni proizvodnjo:<sup>5</sup>

— z zmanjšanjem števila vrst jekel, ki so v uporabi,

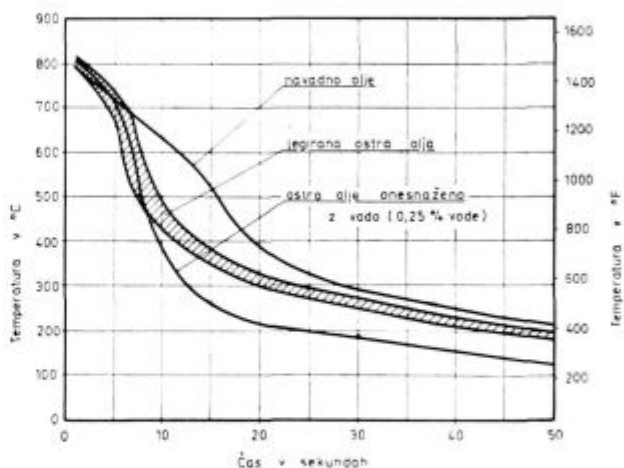
— z zmanjšanjem izmečka oziroma potrebne poprave izdelkov in

— z zmanjšanjem obsega čiščenja po kaljenju.

Čeprav je bolj v navadi izbirati olje k jeklu, ki ga termično obdelujemo, je včasih nujno tudi obratno. Če imamo samo en bazen z ostrim oljem, potem zahteva to olje uporabo novega jekla s slabšo kaljivostjo. S tem so zmanjšane deformacije in stroški.

Na izbor olja vpliva tudi obratovalna temperatura, ki se vzdržuje iz kakršnega koli vzroka.

Ko izbiramo olje za kaljenje, si zelo lahko pomagamo z ohlajevalnimi krivuljami olj. Na teh krivuljah se vidi hitrost ohlajanja v posameznih temperaturnih območjih. Primer takih ohlajevalnih krivulj kaže slika 17, kjer so krivulje osmih ostrih olj (šrafirani pas), navadnega mineralnega olja in olja s približno 0,25 % vode. Te krivulje so dobljene z vzorcem avstenitnega nerjavnega jekla premera 12,7 mm, dolžine 63,5 mm, kaljenim v teh tekočinah s temperaturo 520° C.<sup>5</sup>



Sl. 17:

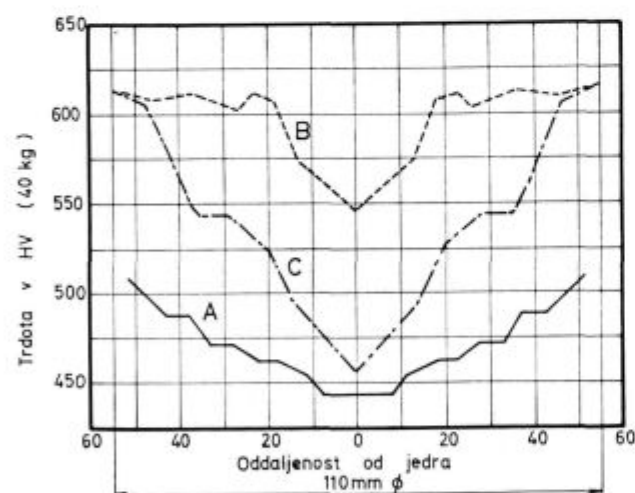
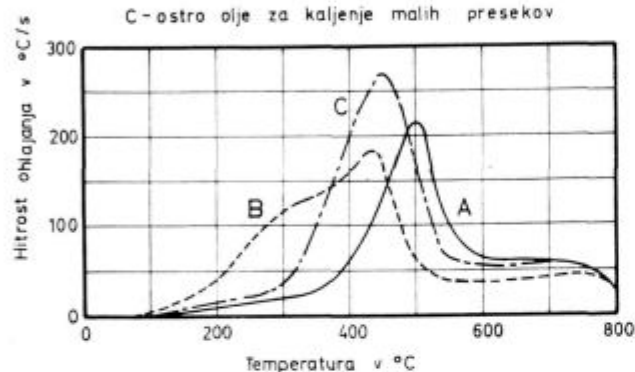
Ohlajevalne krivulje jedra avstenitnega nerjavnega jekla v navadnem legiranem in z vodo onesnaženem olju



Hladilna sposobnost pa je odvisna od oksidne kože, cirkulacije in temperature. Naslednja tabela podaja primerjavo magnetnega preizkusa (opisan v poglavju Magnetska metoda 6 ostrih in 2 navadnih olj za ozorce, ogrevane v oksidacijski in redukcijski atmosferi.<sup>5</sup>

Vzorec olja	Čas ohlajanja v sekundah od 913° do 354° C za vzorce ogrevane v:	
	oksidacijski atmosferi	redukcijski atmosferi
Ostro olje	9,8 . . . . 14,4	15,0 . . . . 20,4
Navadno olje	17,8 . . . . 19,6	29,9 . . . . 31,0

A - navadno mineralno olje 4,5° E/50° C  
 B - ostro olje za kaljenje velikih presekov  
 C - ostro olje za kaljenje malih presekov



Sl. 18:

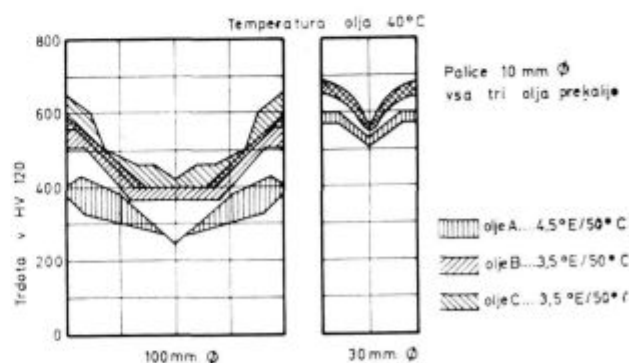
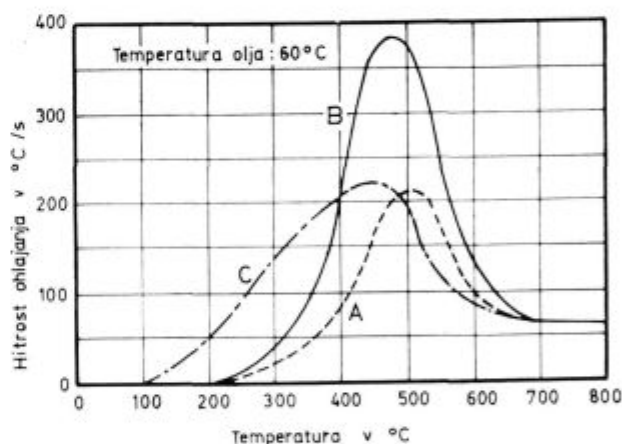
Krivulje ohlajevalnih hitrosti (Ag-krogla  $\phi$  20 mm) kalilnih olj in dosežene trdote na jekleni palici  $\phi$  110 mm

Pri izbiri olj pa si še bolj pomagamo s **krivuljami ohlajevalnih hitrosti**, ki jih posnamemo s **srebrno kroglo**. Za tri kalilna olja podaja take krivulje slika 18, ki so dobljene s srebrno kroglo premera 20 mm. A — navadno mineralno olje z viskoznostjo 4,5° E/50° C, B — ostro olje za kaljenje

velikih presekov in C — ostro olje za kaljenje drobnih presekov. Kos premera 110 mm najgloblje kali olje B, najmanj pa olje A. Drobnim kosom da večjo trdoto tudi olje C.<sup>7</sup>

Seveda pa si lahko pomagamo z določanjem **trdote po preseku kaljenega kosa**. Na te rezultate vpliva tudi sestava taline. Slika 19 prikazuje ohlajevalne vrednosti za tri olja, posnete s srebrno kroglo in rezultate prečnih trdot za dve debelini jeklenih vzorcev ( $\phi$  100 in  $\phi$  30 mm) za ta tri olja. Olje A je mineralno olje z viskoznostjo 4,5° E/50° C za svetlo kaljenje. Olji B in C sta legirani olji z viskoznostjo 3,5° E/50° C, ki imata določene dodatke. Ti dodatki vplivajo zelo različno, kot je videti na sliki. Olje B ima maksimalno ohlajevalno hitrost v temperaturnem območju 400—500° C (v fazi kuhanja). Olje C je uporabno za debelejšo koso, ker odvaža tudi pri nižjih temperaturah še dokaj hitro vso toploto, ki prihaja iz sredine kosa in s tem doseže večjo trdoto v jedru, t. j. večjo prekaljivost.<sup>2</sup> Olje B je uporabnejše za kaljenje drobnih kosov.

Kje naj leži **maksimalna ohlajevalna hitrost** na ohlajevalni krivulji srebrne krogle? Pri kaljenju hočemo vse dele kosa ohlajati z nadkritično ohlajevalno hitrostjo, tudi jedro. Za zelo tanke kose naj bo maksimum nekaj nad 650° C. Za debele kose



Sl. 19:

Krivulje ohlajevalnih hitrosti (Ag krogla) kalilnih olj in dosežene trdote na jeklenih palicah (jeklo C 4830 — 50 CrV4)  $\phi$  100, 30 in 10 mm

pa naj leži čim nižje, in to tem nižje, čim večji je presek. Pri velikih presekih visokoležeči maksimum povzroči večje toplotne napetosti in s tem prekomerne deformacije. Če hočemo kaliti ne samo za dosego enakomerne trdote, temveč tudi brez deformacij, ne sme ohlajevalni maksimum nastopiti prej, kot je za najgloblje plasti jekla to potrebno in ne sme trajati dlje kot toliko, da so vse plasti pretvorjene v martenzit.<sup>7</sup>

Tudi naslednja slika 20 nam lahko ilustrira izbor olja. Temperatura olja naj bo 60 dJo 100<sup>o</sup> C. Zelo tanke liste in trakove se kali v olju s temperaturo do 120<sup>o</sup> C. Za kose, ki so zelo nagnjeni k deformacijam, je boljša uporaba toplega olja (150 do 200<sup>o</sup> C) kot solne kopeli.<sup>2</sup>

Študij krivulje ohlajevalnih hitrosti za olja, ki jo dobimo s srebrno kroglo, nam daje še naslednje zaključke o vplivih posameznih faktorjev na rezultate kaljenja in o vplivu faktorjev med seboj.

Sprememba faktorja ...	dosežemo	Rezultat spremembe
Pomik maksimuma k nižjim temperaturam (v levo)	z višjo temperaturo, manjšo viskoznostjo	višja trdota, večja prekaljivost
Pomik maksimuma k višjim temperaturam (v desno)	z nižjo temperaturo, večjo viskoznostjo	nižja trdota, manjša prekaljivost
Dvig maksimuma (povečanje ohlajevalne hitrosti)		višja trdota, manjša prekaljivost, večji vpliv temperature olja na trdoto
Širša krivulja (širši maksimum)		večja prekaljivost, manjši padec trdote pri višji temperaturi olja
Višja temperatura olja		maksimum se pomakne v levo, zmanjša se viskoznost, ojača stabilnost parnega plašča, zmanjša ohlajevalna sposobnost
Manjša viskoznost		maksimum se pomakne v levo

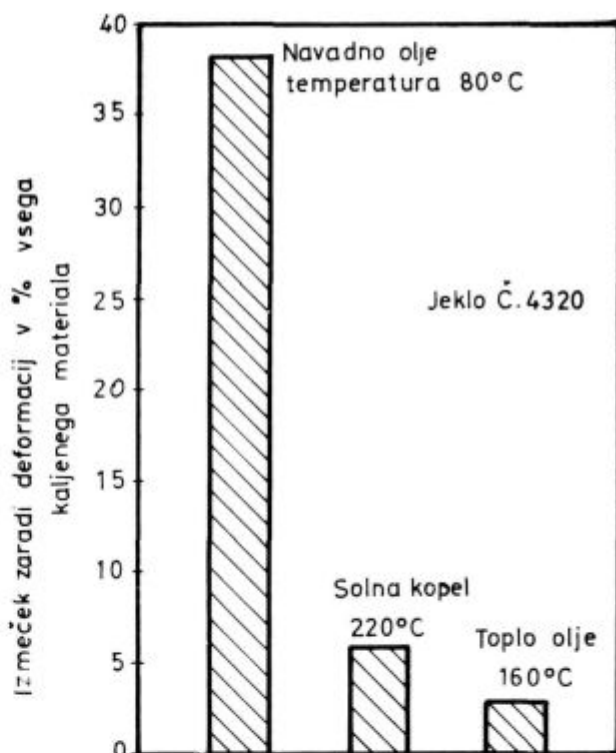
Pri uporabi se lastnosti olja spreminjajo. Olja zgublajo kalilno sposobnost, posebno navadna nelegirana olja. Pri normalnih pogojih se sme olje

uporabljati 5 do 10 let. Sveže olje ima še veliko lahko hlapljivih ogljikovodikov in drugih sestavin, ki jih izgubi že v prvem tednu uporabe. Na življenjsko dobo močno vpliva onesnaženje s škajo in vodo, zato se mora olje sproti čistiti.<sup>2</sup>

Naslednja slika 21 nam prikazuje primerjavo krivulj ohlajevalnih hitrosti (srebrna krogla) za sveže in rabljeno olje: A — navadno olje z viskoznostjo 4,5<sup>o</sup> E/50<sup>o</sup> C, B — ostro olje z viskoznostjo 1,6<sup>o</sup> E/50<sup>o</sup> C. Krivulje jasno kažejo, da se navadna olja veliko bolj spreminjajo kot legirana ostra olja.<sup>7</sup>

## PREIZKUSANJE IN OCENA TEKOČIH OHLAJEVALNIH SREDSTEV

Za preizkušanje in oceno različnih kalilnih sredstev je več načinov. Veliko se uporablja termična metoda direktnega določanja ohlajevalne krivulje. Iz te se grafično dobi krivuljo ohlajevalnih hitrosti. Znane so tudi intervalne metode, fizikalni metodi z vročo žico in magnetska metoda, metalurška metoda kaljivosti, vizualna metoda, Grossmannova metoda ohlajevalne intenzivnosti in laboratorijske fizikalno-kemijske metode.



Sl. 20: Deformacije pri kaljenju plinsko naogliččenih zobatih koles (Č 4320—16 Mn Cr 5) v različnih kopelih

## Ohlajevalna krivulja

Ohlajevalna krivulja je najbolj točna ocena ohlajevalne sposobnosti, s katero se ugotavlja kompletni kalilni proces. Ohlajevalna krivulja prikazuje prenos toplote pri kaljenju kot tudi točko rekalescence v kaljivih jeklih.

A - navadno kalilno olje 4,5 °E/50°C

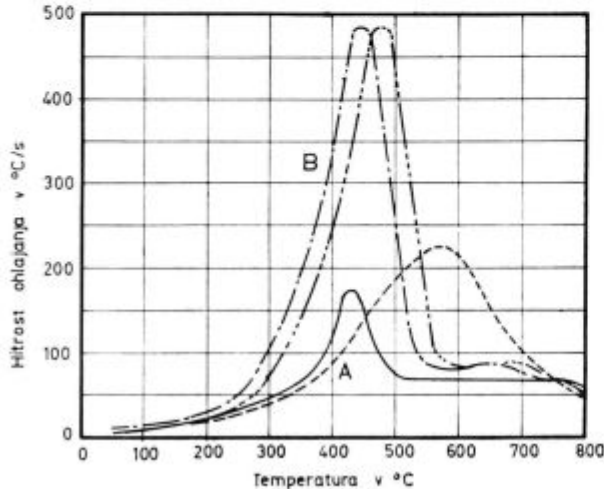
— novo nerabljeno

--- 6 let rabljeno, vsebnost asfalta 2%, kalilna sposobnost močno zmanjšana

B - ostrejšje in stabilnejše olje, 1,6 °E/50°C

— novo nerabljeno

--- 7 let rabljeno, vsebnost asfalta 0,5 %, kalilna sposobnost komaj zmanjšana



Sl. 21:

Sprememba ohlajevalne sposobnosti olja pri uporabi

Za posnemanje ohlajevalne krivulje se lahko uporabi način s **srebrno kroglo** po Engelu<sup>11, 13</sup> kroglo iz avstenitnega jekla, ki tudi nima premene in škajanja ali način s cilindričnim vzorcem. Namesto srebra se lahko uporabi avstenitno nerjavno jeklo, nikelj ali pa tudi ogljično jeklo. Krogla ima lahko premere 10, 20, 50... mm. Termopar se namesti ali v sredino ali čim bližje k površini ali oboje. Zaradi slabše toplotne prevodnosti mora biti namestitev termopara v jeklih bolj precizna kot v vzorcih iz srebra. Tudi instrument mora hitreje reagirati pri srebru kot pri jeklu. Na površini nameščeni termopar mora biti sposoben odkriti posebnosti ohlajevalne krivulje, ki jih ne občuti v centru nameščeni termopar.<sup>5</sup>

Na sliki 22 je shematsko prikazana naprava za določanje ohlajevalne krivulje z avstenitno kroglo. Nad bazenčkom s preizkuševanim oljem je nameščena električno ogrevana pečica, v kateri se ogreva krogla. V središču krogle je nameščeni termopar (npr. Fe — konstantan) in zaščiten v nosilni cevi (tudi avstenitna). Krogla se v peči ogreje na predpisano temperaturo (800°C) in spusti v olje. Temperaturo se neprekinjeno meri z elektronskim pisarjem. Olje je lahko mirno ali ga mešamo. Ča-

sovni pomik traku naj bo med preiskavo v intervalih 0,1 sek., posebno če je termopar nameščen na površini krogle.<sup>8</sup>

S pomočjo Ott-derivimetra se grafično dobi **krivuljo ohlajevalnih hitrosti**, ki omogočajo najjasnejši vpogled v lastnost olja.<sup>8</sup> Iz krivulje lahko odčitavamo ohlajevalne hitrosti za vsako temperaturo posebej in v vsaki fazi kaljenja.

Izkustveno lahko **izračunamo hitrost ohlajanja** jeklenega kosa pri 720°C po naslednji enačbi:<sup>9</sup>

$$V = \frac{0,4 \cdot S}{W} \cdot n \cdot C_2$$

V... hitrost ohlajanja v 100°C/s

S... površina kosa v cm<sup>2</sup>

W... prostornina kosa v cm<sup>3</sup>

n in C<sub>2</sub>... konstante, ki so odvisne od ohlajevalnega sredstva.

Ohlajevalno sredstvo	Oblika kosa	n	C <sub>2</sub>
5% NaOH	Okrogle epruvete, palice	1,84	3,86
Voda	Krogla	1,75	3,89
	Okrogle epruvete, palice	1,75	3,91
	Plošče	1,75	4,03
povprečno			3,94
Olje	Krogla	1,40	3,22
	Okrogle epruvete, palice	1,40	3,03
povprečno			3,12
Mirni zrak	Okrogle epruvete, palice	1,15	0,31

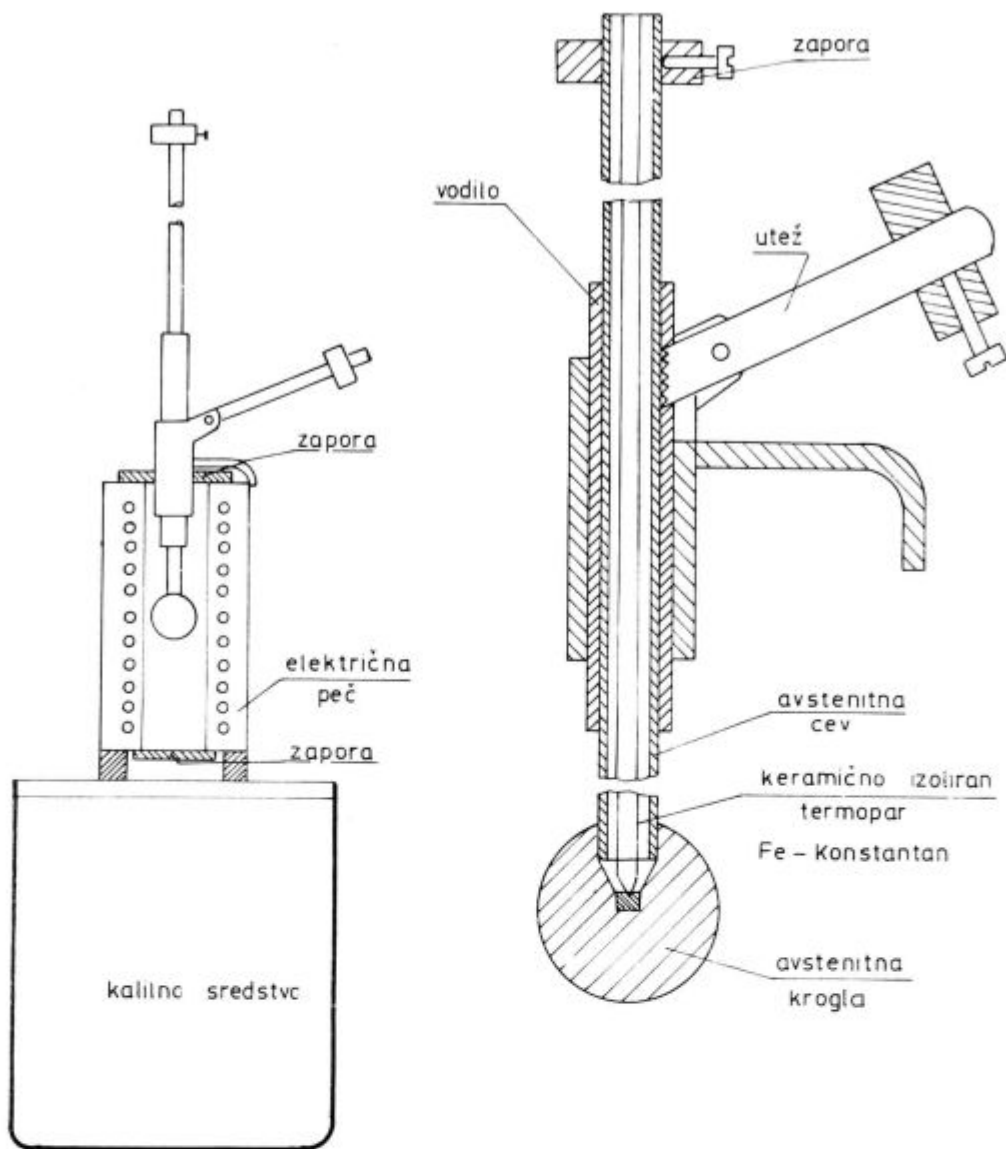
### Metoda intervala

Intervalna metoda »prvih pet sekund« je hitra metoda za primerjanje ohlajevalnih sposobnosti kalilnih sredstev. Pri tej metodi postavimo dvolitrski vzorec olja v kalorimeter in beležimo temperaturo. Kovinski valjasti vzorec Ø 25 mm, dolžine 66 mm, običajno iz nerjavnega jekla, se ogreje na 815°C in ohlaja v olju točno 5 sekund. Nato se oljni vzorec dobro premeša, da se izenači temperaturo se ponovi za serijo vzorcev. Enak vzorec se ohlaja v olju do najnižje temperature (okolja). Ohlajevalno sposobnost olja se nato izračuna:

A

B

. 100% in dobimo v odstotkih izraženo sposobnost odvajanja toplote v 5 sekundah v primerjavi s celotno toploto. Pri tej formuli pomeni A — povprečni narastek temperature pri petsekundnem ohlajanju vzorca, B — pa maksimalni narastek temperature oljnega vzorca pri popolnem kaljenju.<sup>5</sup>



Sl. 22:  
Shema naprave za posnemanje ohlajevalnih krivulj

Namesto petsekundnega merjenja lahko uporabljamo osemsekundno merjenje. Dopusna so seveda tudi merjenja v drugih intervalih.<sup>4</sup>

Naprava je sestavljena iz vertikalne cilindrične električne peči, pod njo je v kalorimetru kalilno olje z mešalcem. Kalorimeter je opremljen z napravo za ogrevanje in ohlajanje, za merjenje in regulacijo temperature; tako se lahko kalilni pogoji spreminjajo po želji. Vzorec, običajno iz nerjavnega jekla, ima v sredini termopar. Ko doseže v peči predpisano temperaturo, se vzorec avtomatično spusti v olje. Pri tem se meri čas in registrira temperaturo.

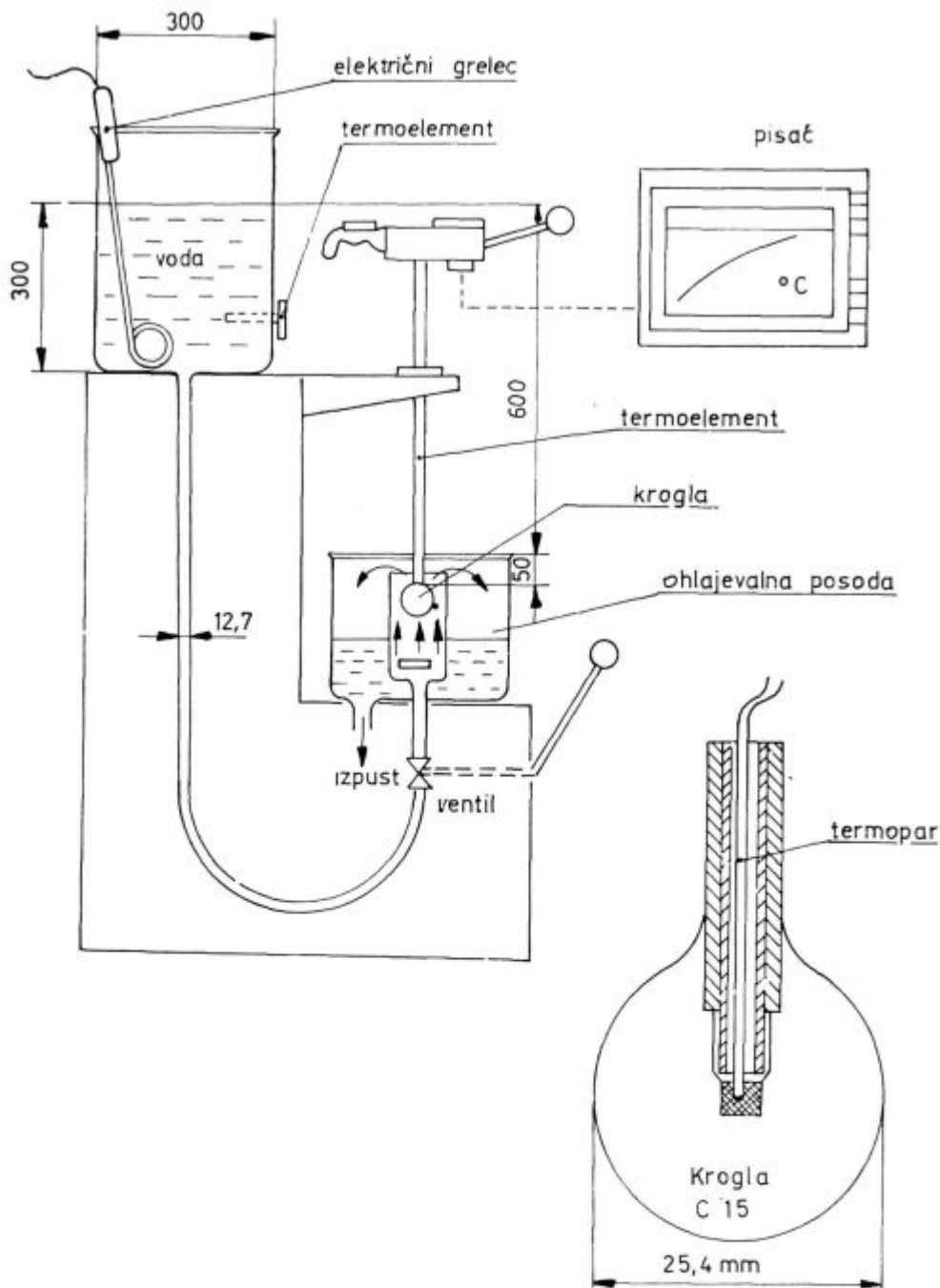
Ta metoda je široko uporabna za določanje velikih sprememb pri kalilnem olju, ker je hitra in ne potrebuje posebne opreme.

Tako lahko ocenimo delež odvedene toplote v posameznih fazah, izraženo z odstotki maksimal-

nega narastka temperature, če opazujemo naraščanje temperature v različnih intervalih. Čim večji je odstotek v prvi fazi, tem večjo ohlajevalno sposobnost ima in tem boljše je olje. To je eden od natančnih načinov za ločitev med kalilnimi olji in daje dragocen podatek o lastnostih olja v različnih fazah kaljenja. Ta metoda razporedi olja v isto vrsto kot ohlajevalne krivulje.<sup>4</sup> Ker zajema samo višje temperaturno območje kaljenja, pa nas pri primerjavi olj lahko zavede.

#### Metoda O. Dorigo<sup>9 14</sup>

Ta metoda je kombinacija med opisano intervalno metodo in Grossmannovo metodo določanja H-vrednosti (opisana v poglavju Intenzivnost ohlajanja). S to metodo dobimo praktično enoto ohlajevalne sposobnosti.



Sl. 23:

Shema naprave za določevanje ohlajevalne vrednosti °D

Slika 23 prikazuje shemo celotne naprave za ohlajanje v vodi in konstrukcijo krogle, ki ima v tem primeru premer 50,8 mm (oziroma 2 coli) in je narejena iz jekla C 15. V centru krogle je montiran termopar.

Kroglo ogrejemo v posebni peči z varovalno atmosfero ali v solni kopeli na temperaturo 800° C in jo potopimo v gibajočo se vodo vsaj 50 mm globoko, pri čemer takoj vključimo štoparico (1/100 sek.). Čas merimo do trenutka, ko pade temperatura v centru krogle na 250° C. Z večkratno pono-

vitvijo dobimo dovolj točen povprečni osnovni čas, ki znaša za vodovodno vodo 0,44 minut. Ohlajevalno sposobnost za vodo dobimo:

$$^{\circ}D = \frac{K}{T} = \frac{44}{0,44} = 100$$

pri čemer je:

$K = 0,44 \cdot 100 = 44$  minut... osnovni primerjalni čas,

$T = 0,44$  minut... izmerjeni čas.

Za ostala sredstva dobimo ohlajevalno sposobnost z različnim mešanjem, če opisano prenosno epruveto (kroglo) ogrejemo zopet v varovalni atmosferi ali solni kopeli na 800° C in jo potopimo vsaj 100 mm globoko v merjeno sredstvo. Pri tem zopet merimo s štoparico čas, da pade temperatura od 800 na 250° C. Iz osnovnega časa K in tega izmerjenega časa T (npr. za merjeno sredstvo smo namerili čas (T = 2,03 minute) izračunamo ohlajevalno sposobnost.

$${}^{\circ}D = \frac{K}{T} = \frac{44}{2,03} = 21,7$$

Poleg omenjenega intervala 800—250° C lahko uporabimo kakšen drug interval, npr. 800—550° C ali podobno.

Ta metoda ni znanstvena, temveč praktična in jo lahko dobro uporabimo v obratu kakor tudi pri kontroli kupljenih sredstev.

### Metoda z vročo žico

#### Metoda z vročo

Ta metoda sestoji iz ogrevanja žice NiCr z električnim tokom v malem vzorcu olja (200 ml). Olje se navadno preizkuša pri sobni temperaturi; žica je pritrjena na dve bakreni elektrodi. Ogrevanje žice se uravnava z reostatom, tako da tok enosmerno narašča. Ohlajevalno sposobnost olja se označuje s kvadriranjem odčitka maksimalnega toka, merjenega na ampermetru, ko se olje vžge. Olja, ki so sposobna odvajati toploto hitreje, dovoljujejo skozi žico večji tok in tako se registrira večja vrednost toka. Ohlajanje pa se izvrši precej nad normalnim območjem ogrevanja za jekla in ne kaže velike razlike med ostrimi olji. Ta test je podoben testu »prvih pet sekund« v tem, da samo primerja olja v visokem temperaturnem območju kaljenja.

### Magnetska metoda

To metodo opravimo z ogretjem pribl. 50 g težke nikljeve krogle premera 22,2 mm (7/8") na 885° C (1625° F) na zraku ali v varovalni atmosferi (lahko se uporabi difuzijsko kromirana nikljeva krogla, da se izognemo nujnosti uporabe varovalne atmosfere; a označiti se mora spremenjeno površino). Ko je temperatura izenačena, se kroglo kali v vzorcu olja 200 ml, ki se nahaja v magnetnem polju. Potreben je tolikšen čas, da se krogla ohladi od 885° C do Curiejeve temperature za nikelj (354,4° C); pretečeni čas, da pritegne magnet, se označi kot mera za ohlajevalno moč olja. Curiejeva temperatura niklja je pod nosom izotermalnih transformacijskih diagramov za večino jekel. Tako se lahko s to metodo primerja kalilna olja. Čim ostrejšje je olje, tem krajši je čas, da nikelj reagira na magnetizem.

Modificirana magnetna metoda se uporabi za študij vpliva cirkulacije in ogrevanja na hladilno moč kalilnih olj.

Naprava, poznana kot elektronski »kalilometer« (quenchemeter), je montirana neposredno v kalilni sistem, tako da so rezultati dobljeni v normalnih okoliščinah.

### Metalurška metoda<sup>4</sup>

Bistvo metalurške metode ocenjevanja olja je modificirana metoda določanja kaljivosti. Medtem ko se kaljivost določa s kaljenjem različnih jekel v standardni tekočini, se ohlajevalno sposobnost določa s kaljenjem standardnega jekla v različnih preizkuševalnih tekočinah. Na različnih cilindričnih vzorcih se po kaljenju meri trdota na prečnem prerezu. Trdote se nanese v diagram v odvisnosti od oddaljenosti od sredine. Po globini in doseženi trdoti se oceni kaljivost.

To metodo se lahko modificira tako, da se namesto valja uporabi stožec, ki združuje vpliv različnih premerov v enem vzorcu. Po kaljenju se stožec prereže in določi trdota na vzdolžnem prerezu. Stožec ima lahko različne dimenzije, npr. dolžina 130 mm, premer pada od 25 mm do 3 mm, jeklo z 0,45 % C, kaljeno 845° C. Vzdolžno prerezano ploskev je možno tudi mokro jedkati. Že po načinu jedkanja je možno oceniti kalilno sposobnost tekočine.

Za ocenjevanje olja so boljše metode, pri katerih se vzorec (epruveto) pri kaljenju popolnoma potopi, od metod, kjer se epruveto kali s konca oziroma s čela. Od teh zadnjih je Jominyev preizkus najbolj poznan. Ta preizkus je teoretično tudi uporaben za primerjavo ohlajevalnih sposobnosti tekočin, praktično pa ni dovolj selektiven. Curek tekočine, ki ohlajuje čelo epruvete, razbije parni plašč tako hitro, da ni možno opaziti razlike med olji.

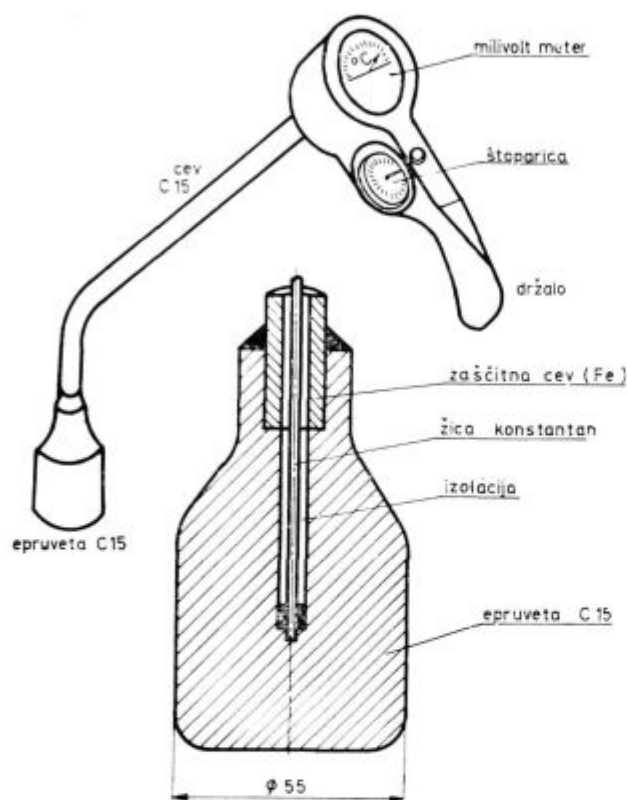
Ohlajevalne tekočine lahko ocenjujemo tudi z zasledovanjem deformacij kalilne **srpaste epruvete**.<sup>5</sup> V svetu je znanih več, bolj ali manj podobnih epruvet z različnimi dimenzijami. Epruveto se naredi iz standardnega kaljivega jekla. Ogreva se jo v peči z varovalno atmosfero in ohlaja v sredstvu, ki ga preizkušamo. Po kaljenju se meri sprememba dimenzij.

Poseben način ocenjevanja kalilnega olja je **vizualno spremljanje kalilnega procesa**. Na ta način se lahko ocenjujejo samo svetlejšje tekočine. Vzorec olja damo v stekleno posodo. Ko potopimo v olje segreto epruveto, opazujemo potek kaljenja. Možno je opaziti konec faze tvorbe parnega plašča, konec druge faze, ko mehurčki izginejo in potek ohlajanja med tretjo fazo, ko je olje mirno. Če olje ni pretemno, se proces lahko filma s kamero večje hitrosti (glej tudi poglavje Pojavi na površini jekla med kaljenjem).

### Intenzivnost ohlajanja

Sposobnost ohlajevalnega sredstva odvajati toploto od vročega kosa se izraža s terminom »faktor ohlajevalne intenzivnosti H«. Za določitev tega

faktorja se meri hitrost ohlajanja v  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  v temperaturnem območju tvorbe perlita (približno med  $721$  in  $500^{\circ}\text{C}$  oziroma  $400^{\circ}\text{C}$ ). Primeren aparat za to merjenje je Meinhardtov aparat (Houghton), ki ga kaže slika 24 (quenchemeter) in ga lahko uporabljamo za nekatere druge metode. Sestavljen je iz telesa (epruvete) iz jekla C 15, ki je s cevjo in termoelementom povezano z merilno glavo, ki ima instrument za merjenje temperature in štoparico. Termopar (Fe - konstantan) je nameščen v centru epruvete.



Sl. 24:

»Houghton« — merilec ohlajevalne sposobnosti

Epruveto se ogreje v solni kopeli na temperaturo  $750^{\circ}\text{C}$  in hladi v preiskovanem sredstvu. Pri tem se meri čas ohlajanja (sekund) v temperaturnem območju  $700$  in  $400^{\circ}\text{C}$ . Izračuna se povprečna ohlajevalna hitrost za to območje. Intenzivnost ohlajanja v vodi pri  $18^{\circ}\text{C}$  se pri istih pogojih in z isto napravo določi  $30^{\circ}\text{C}/\text{s}$ . Razmerje med temi ohlajevalnimi hitrostmi nam da Grossmannovo H - vrednost. Seveda se lahko meri čas ohlajanja tudi za vsakih  $100^{\circ}\text{C}$  ali za temperaturno območje  $700-300^{\circ}\text{C}$  in  $700-200^{\circ}\text{C}$  poleg že omenjenega območja  $700-400^{\circ}\text{C}$ . Pri merjenju ohlajevalnih hitrosti vode se mora upoštevati njeno trdoto oziroma sestavo.<sup>1</sup>

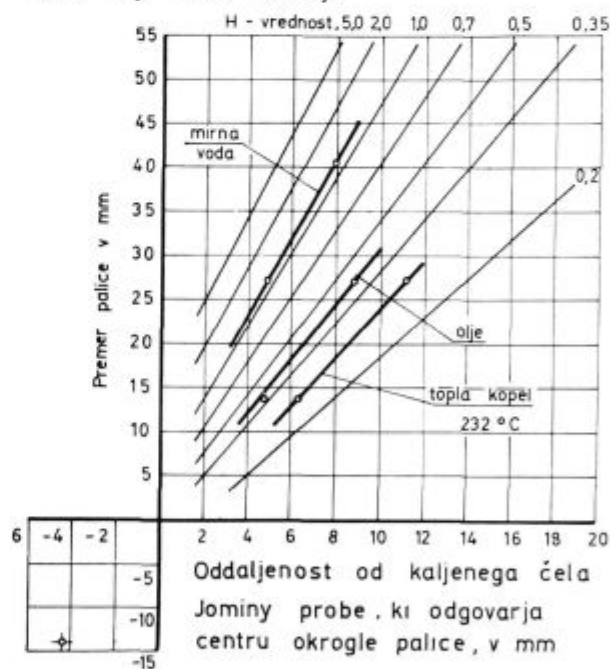
Če je H - vrednost mirne vode 1, potem so H - vrednosti olja, vode in slane vode za posamezne intenzivnosti mešanja podane v naslednji tabeli.<sup>5</sup>

Mešanje	olje	Voda	Slana voda
brez mešanja	0,25 do 0,30	0,9 do 1,0	2,0
blago mešanje	0,30 do 0,35	1,0 do 1,1	2,0 do 2,2
zmerno mešanje	0,35 do 0,40	1,2 do 1,3	—
srednje mešanje	0,40 do 0,5	1,4 do 1,5	—
močno mešanje	0,5 do 0,8	1,5 do 2,0	—
zelo močno mešanje	0,8 do 1,1	2,0 do 6,0	5,0 do 8,0

Odnos med premerom jeklene palice, kaljivostjo in H - vrednostjo je prikazan na sliki 25. Imenuje se tudi diagram po M. A. Grossmannu, ki je razvil koncept H - vrednosti in jo prilagodil kaljivosti jekla. Podrobnosti o tem so opisane v njegovi knjigi »Principi toplotne obdelave«.<sup>15</sup> Diagram se uporablja takole:

H - vrednost (intenzivnost ohlajevanja).

- 5,00 - ostra slana voda - zelo močno mešanje
- 2,00 - slana voda - brez mešanja
- 1,00 - voda - brez mešanja
- 0,70 - ostro olje - zelo močno mešanje
- 0,50 - dobro olje - srednje mešanje
- 0,35 - dobro olje - zmerno mešanje
- 0,20 - olje - brez mešanja



Sl. 25:

Grossmannov diagram odvisnosti premera palice, kaljivosti jekla in H - vrednosti

Če hočemo jeklen kos s premerom  $30$  mm kaliti v olju s srednjim mešanjem, odčitamo za to debelino pri H - vrednosti  $0,5$  na abscisi vrednost

9 mm. To pomeni, da bo sredina palice imela isto trdoto kot standardna Jominyeva proba iz istega jekla pri oddaljenosti 9 mm od kaljenega čela.

Podatki na diagramu so približni, ker obsega kaljenje opis glavnega termina (npr.: »dobro kaljenje v olju — srednje mešanje«). Dodatna težava pri tem je tudi točnost ocenjevanja načina oziroma intenzivnosti mešanja.

Warren F. Rushman je opisal enostavno metodo za ocenjevanje ohlajevalne intenzivnosti kalilne tekočine pri vseh pogojih obremenitve.<sup>16</sup> Metoda bazira na uporabi diagrama na sliki 25. Če poznamo kaljivost jekla, t. j. Jominyevo krivuljo in trdoto v jedru palice poznane premera, je mogoče določiti ohlajevalno intenzivnost H. Na primer 9 mm od kaljenega čela oddaljena točka na Jominyevi probi ima trdoto 45 Rc. Palica iz istega jekla premera 30 mm, ima po kaljenju v tekočini v jedru trdoto 45 Rc. Na diagramu se odčita intenzivnost ohlajanja 0,5.

Ne da bi merili trdoto v jedru palice premera 25 mm, jo lahko določimo z uporabo diagrama na sliki 25. Na primer: trdota v jedru palice naj je 48 Rc, a Jominyeva krivulja za to jeklo ima 48 Rc v oddaljenosti 6 mm od kaljenega čela. Vodoravna in navpična črta za ti dve vrednosti (25 mm Ø in 6 mm) se sekata na črti ohlajevalne intenzivnosti 0,7. Tako smo določili, kako intenzivno se mora pri kaljenju ohlajati jeklena palica premera 2,5 mm, da bomo v jedru dosegli želeno trdoto 48 Rc.

Kot je prikazano na sliki 25 za kaljenje v olju, črte različnih ohlajevalnih intenzivnosti na Grossmannovem diagramu konvergirajo k točki izven diagrama. To točko sečišča se lahko uporabi kot drugo točko na katerikoli novi črti ohlajevalne intenzivnosti. Kot primer je na gornji sliki debeleje označena črta »olja«. Dve poizkusni točki na tej črti sta določeni s kaljenjem palice iz jekla znane kaljivosti pri dveh različnih premerih (27 in 13 mm). Z uporabo palice z dvema premeroma se nam nudi odličen način za kontrolo rezultatov, ker daje tri točke na črti. Rezultati treh različnih operacij kaljenja (v vodi, olju in topli kopeli), kar je določeno z dvema premeroma probe, so označeni na sliki. Osnovna prednost te metode je, da se probe lahko kalijo skupaj z ostalimi izdelki; tako kaljenje je ocenjeno pri pogojih temperature in mešanja, ki dejansko prevladuje v proizvodnem kaljenju kosov. Proba mora imeti tak premer, da s kaljenjem dosežena trdota v jedru probe leži na padajočem delu kalilne krivulje za preizkušano jeklo. Metodo se lahko ugodneje izvede z jeklom za površinsko kaljenje, ker ta tip jekla dopušča uporabo prob z majhnimi premeri, ki se lažje stržijo po kaljenju. Uporaba površinsko kaljivega jekla ne zmanjšuje rezultatov preizkušanja, ker je intenzivnost ohlajanja neodvisna karakteristika kopeli in ni odvisna od velikosti kosov ali kaljivosti.

### Standardni fizikalno-kemijski preizkusi

K standardnim preizkusom prištevamo določitev **vnetišča** in **gorišča**.

**Viskoznost** je absolutna dinamična in absolutna kinematična. V C. G. S. sistemu je enota za absolutno dinamično viskoznost — poise (p.), a enota za absolutno kinematično viskoznost je stoke in

$$\text{stoke} = \frac{p.}{\text{gostota}}$$

Razen za zelo viskozne tekočine se uporablja stotine teh vrednosti, t. j. centipoise (cp.) in centistok (cs.). Absolutna kinematična viskoznost se meri direktno z merjenjem časa pretoka standardne količine olja skozi stekleno kapilarno viskozimetra (poznanih je Ubbelohdeov viskozimeter). Iz tako dobljene vrednosti po gornjem obrazcu izračunamo dinamično viskoznost. Za večino primerov zadostuje kinematična viskoznost. Posebni primeri viskozimetrov so pa: Redwoodov, Sayboltov (USA) in Englerjev (Evropa).

Poleg omenjenih podatkov viskoznosti imamo v novejšem času še **indeks viskoznosti**. Ta indeks je empirična vrednost, ki naznanja vpliv spremembe temperature na viskoznost olja. Vrednosti, dobljene s posameznimi viskozimetri, lahko preračunamo v drugo enoto pri isti temperaturi, če pomeni:

$V_k$  — kinematična viskoznost (centistoke),

E — stopinje po Englerju,

R. I. — Redwood I. (sekunde),

S. U. — Saybolt Univerzal (sekunde).

Za viskoznosti nad 10 cs. se uporabljajo naslednji faktorji preračunavanja:

$$E = 0,132 V_k \quad V_k = 7,58 E$$

$$R. I. = 4,05 V_k \quad R. I. = 30,7 E$$

$$S. U. = 4,62 V_k \quad S. U. = 35,11 E$$

$$V_k = 0,247 R. I. \quad V_k = 0,216 S. U.$$

$$E = 0,0326 R. I. \quad E = 0,0285 S. U.$$

$$S. U. = 1,14 R. I. \quad R. I. = 0,877 S. U.$$

Pri oljih za popušcanje in izotermno kaljenje (martempering) se določa še najnižjo temperaturo, pri kateri olje še teče.

Starost olja se zasleduje z določanjem **nevtralizacijskega števila** oziroma kislosti, t. j. število miligramov KOH, ki je potrebno za nevtralizacijo enega grama olja. Rafinirana olja vsebujejo brezpomembno količino kislin. Poslabšanje olja je povezano s povečanjem kislosti.

Enako velja za **število umiljenja** (oz. saponifikacijsko število), ki določa pretvarjanje olja in masti v milo z alkalijami. Število umiljenja je število miligramov KOH, ki je potrebno za umiljenje enega grama olja.

Poleg tega se v oljih redno določa tudi **specifična teža** in barva.



## Posebni tehnološki preizkusi<sup>4</sup>

Ceprav je zanimiva, vendar ni standardne metode za določevanje **hlapljivosti** kalilnih olj. Včasih se to določa pri kalilnih oljih n. pr. z ogrevanjem pri temperaturi 150 do 200° C 2 do 8 ur. Potem se meri izgube na teži. To določanje je zelo približno, ker so pogoji kaljenja različni.

S **sedimentacijskim preizkusom** rabljenih olj določimo dvoje snovi: oksidacijske produkte in neraztopljene tuje materije. Nekaj oksidacijskih produktov je lahko raztopljenih v olju, nekaj pa je izločenih. Tuje materije v rabljenem olju so: škaja, kalilne soli, rja itd.

Kako in zakaj se določa vsebnost **vode**, je že opisano v poglavju Voda v kalilnem olju.

Mnogo laboratorijskih metod je izdelanih za ugotavljanje, kako se olje obnaša v uporabi pri oksidacijskih pogojih. Tipični primer je britanski **oksidacijski test**, pri katerem se piha zrak skozi olje pri 200° C pri kontroliranih pogojih. Pred oksidacijo in po njej se odloča viskoznost in **preizkus koksanja** (Couradson in Ramsbottom).

Po potrebi se olju določa tudi prevodnost toplote in latentna toplota.

## Preizkusi novega in rabljenega olja<sup>4</sup>

Moderna mineralna kalilna olja imajo dolgo uporabnost zaradi visoke notranje stabilnosti.

Težko pa je izumiti enostaven laboratorijski preizkus, ki bi dal resnično oceno o uporabnosti in obnašanju olja. Malo drugače je s popuščnimi olji in olji za izotermno kaljenje.

Pri **novem svežem olju** navadno zadostuje določiti vnetišče in viskoznost, vizualni pregled čistoče in bistrosti ter prisotnost tujih snovi. Če hočemo ugotoviti vsebnost mastnih snovi, se določi še število umiljenja. Popuščna olja in olja za izotermno kaljenje so navadno brez masti. Kalilna olja, v katerih se kali iz solnih kopeli, naj bodo brez mastnih snovi; nekaj jih smejo vsebovati ostale vrste olj.

**Rabljene olja** ni potrebno redno kontrolirati. Če hočemo oceniti stanje olja, pa se navadno priporočajo naslednje določbe: viskoznost, vnetišče, sedimentacijo in nevtralizacijsko število. V praksi je tendenca, da naraščajo vrednosti za vse te štiri lastnosti. Ob primerjanju teh vrednosti z vrednostmi za sveže olje ugotovimo, kako je napredovalo poslabšanje olja oziroma ugotovimo nenormalne pojave. Manj rafinirana olja se bolj spreminjajo. Zelo priporočljiva je kontrola vsebnosti vode v olju. Če je nad 0,5 %, smemo posumiti v kvaliteto olja in je zadosten vzrok za zamenjavo ali reklamacijo olja.

## Zaključek

Proces kaljenja je sestavljen iz dveh glavnih operacij: ogrevanja na kalilno temperaturo in ohlajanja s primerno hitrostjo. Na rezultate kaljenja

torej močno vpliva vrsta in stanje ohlajevalnega sredstva. Če je ohlajevalno sredstvo tako važno, potem moramo posvetiti dovolj veliko skrb izbiri in vzdrževanju ohlajevalnega sredstva.

Vodovodna voda je res najcenejše kalilno sredstvo, tudi vzdrževati jo je lahko, vendar je zelo neugodno sredstvo. Ko vodi, v kateri kalimo, močno naraste temperatura, se maksimum ohlajevalne hitrosti pomakne iz območja tvorbe perlita in bainita v območje tvorbe martenzita. To se pri kalilnih oljih in slani vode ne dogaja. Zato se pri večjih zahtevah izogibajmo kaljenju v navadni vodi; enako neugodni pogoji kaljenja so v milnici in emulziji.

Kalilna olja so v zadnjem času že precej različna in prilagojena posameznim zahtevam. Zato je razumljivo, da je potrebno spoznati te lastnosti olj in izbirati primerna olja: za kaljenje kosov z velikim presekom izberemo olje, ki nima prevelike maksimalne ohlajevalne hitrosti in še to pomaknjeno v območje tvorbe bainita, za kaljenje drobnih kosov pa je maksimalna ohlajevalna hitrost lahko večja in pri višji temperaturi (v območju tvorbe perlita ali med območjem tvorbe perlita in območjem tvorbe bainita). Pri tem moramo upoštevati, da imajo posebne kemične dodatke. Upoštevati moramo tudi to, da so legirana mineralna olja veliko stabilnejša in se z dolgoletno rabo njihove ohlajevalne sposobnosti zelo malo spremenijo.

Pri izbiri kalilnega olja igra veliko vlogo vnetišče olja, posebno v takih obratih, ki nimajo možnosti sigurnega vzdrževanja dovolj nizke temperature olja, a je olje močno obremenjeno. V takem primeru tudi ni možno izbrati najprimernejše olje, ker imajo posebna olja velikokrat nižjo temperaturo vnetišča kot navadna olja.

Razvitih je precej metod preizkušanja kalilnih tekočin od strogo laboratorijskih do strogo obratnih, praktičnih. Posebno v zadnjih desetletjih se razvijajo eksaktnejše metode, katerih rezultati preizkušanja so čedalje bolj uporabni v praksi.

Najjasnejšo sliko o lastnosti kalilnega olja da vsekakor krivulja ohlajevalnih hitrosti, ki jo dobimo iz krivulje ohlajanja srebrne kroglice. Ta metoda zahteva precej laboratorijske opreme. Rezultati, dobljeni s to metodo, se težko prenesejo na praktične pogoje. Zato so morda najprimernejše razne metalurške metode in metoda določanja faktorja intenzivnosti ohlajanja H. S to metodo se tudi lahko loči tekočine med seboj in določa optimalno obratovalno temperaturo. Za določanje H-vrednosti se rabi zelo malo laboratorijske opreme.

Poleg teh preizkušanj pa se ne sme zanemariti preizkušanja fizikalno kemijskih lastnosti tekočin. Za kalilna olja je vsekakor potrebno redno zasledovati specifično težo, vnetišče in gorišče, viskoznost, število umiljenja, nevtralizacijsko število in vsebnost vode. Bazen z oljem pa se mora redno čistiti.

## Literatura

<sup>1</sup> Rührenbeck A., Das Abkühlvermögen der Härteöle und ihre Einordnung in die Reihe der gebräuchlichen Abkühlmittel, Härterei — techn. Mitt., Bd. 10, H. 2.

<sup>2</sup> Kara W. H., Öle und Einrichtungen für die Ölhärtung von Stahl, Stahl u. Eisen 81 (1961) Nr. 21, str. 1416

<sup>3</sup> Peter W., Über das Abkühlvermögen flüssiger Härtemittel, Archiv f. d. Eisenhüttenwesen 20 (1949) H. 7/8, str. 263/274.

<sup>4</sup> Oils for Heat Treatment. Shell publikacija (fotokop.)

<sup>5</sup> Quenching and Martempering, Ohio, ASM (cop. 1964) XIII + 277 str.

<sup>6</sup> Roberts G. A., J. C. Hamaker, A. R. Johnson, Tool Steels, Ohio, ASM, (cop. 1962) XX + 780 str.

<sup>7</sup> Burgdorf Karl W., Das Abc der Silberkugelkurve der Abschreckhärtemittel, Das Industrieblatt, Julij 1958.

<sup>8</sup> Hauke E., S. Pakrasi, Festigkeitverhalten eines gehärteten Werkzeugstahles in Abhängigkeit von Anlasszustand, Härterei — techn. Mitt., 20 (1965) H. 1, str. 1/16.

<sup>9</sup> Veličković Z., Prikaz metode Dr. O. Dorigo za praktično določanje H-vrednosti ohlajevalnih sredstev za kaljenje, Zbornik referatov »Savremena tehnologija termičke obrade metala«, Beograd 1966.

<sup>10</sup> Schaaber O., R. Catterjee — Fischer, Härterei — techn. und Wärmebehandl., 14 (1959).

<sup>11</sup> Rose A., Arch. Eisenhüttenwes. 1939/40, str. 345/54

<sup>12</sup> Kopietz K. H., Härterei — techn. und Wärmebehandl. 1957, str. 37.

<sup>13</sup> Engel E., Untersuchungen über die Stahlhärtung, Köbenhavn, Danmark Naturvidenskabelige Samfund 1931.

<sup>14</sup> Dorigo O., Proposition d'une unite pratique pour le pouvoir refroidissant, Lausanne, Societe Suisse des Traitements thermiques 1965.

<sup>15</sup> Grossmann M. A., E. C. Bain, Principles of Heat Treatment, 5. izd., Ohio, ASM 1964.

<sup>16</sup> Warren F. Rushman, Metal Progress, dec. 1963.

## Obrobna kaljivost cementacijskih jekel

Preizkušanje kaljivosti cementiranih jekel predstavlja poseben problem. Poznanje te lastnosti je zelo pomembno pri izbiri cementacijskih jekel za različne namene uporabe in za izbiro pogojev toplotne obdelave. Razviti je treba ustrezno metodiko preizkušanja in prikazovanja rezultatov preizkušanja kaljivosti. Preizkušanje je treba vzporedno prilagoditi tudi tekoči kontroli teh lastnosti.

Članek obravnava te probleme na praktičnih primerih.

### Uvod

Z vedno hitrejšim razvojem tehnike raste potreba po spoznavanju lastnosti jekla, ker je le ob dobrem spoznavanju teh mogoče jeklo pravilno uporabiti in izkoristiti. V zvezi s tem se hitro razvija tudi preizkušanje obrobne kaljivosti.

Do leta 1955 so v literaturi obravnavali pri cementacijskem jeklu v večini le vplive časa cementacije, temperature cementacije in vplive legirnih elementov na penetracijo ogljika.<sup>1, 2, 3, 6</sup>

Kmalu se je pokazala potreba spoznavanja kaljivosti. V interesu proizvajalcev in potrošnikov so bili izdelani pasovi kaljivosti cementacijskih jekel. Vsa objavljena dela in podatki so se omejevali v glavnem na kaljivost jedra cementacijskih jekel. Podatki o kaljivosti cementirane plasti pod imenom »obrobna kaljivost« so razmeroma nova stvar. Preizkušanje teh lastnosti si hitro utira pot med proizvajalci, še bolj pa med potrošniki cementacijskih jekel. Vedno bolj zanima tehnika cementirana plast in to celo bolj kot jedro! Če cementirana plast ne ustreza namenu, so še tako dobre lastnosti jedra brez pomena. To velja za mehanske in kalilne lastnosti.

Jominy in Boegehold<sup>4</sup> sta razvila metodo preizkušanja kaljivosti s čelnim kaljenjem probe kot način za preizkušanje kaljivosti cementiranih jekel. To je bila prva študija kaljivosti cementirane plasti, izvršena na dvanajstih vrstah SAE jekel z meritvami trdote na površini in v globini 0,015" (0,381 mm) pod površino.

Kayser, Thomson in Boegehold<sup>5</sup> so predlagali uporabo tk. im. trapezoidne probe za čelno kaljenje pri določanju kaljivosti cementiranih jekel. Trapezoidno probo so smatrali za zanesljivejšo pri določanju kaljivosti cementirane plasti, a pozneje so jo opustili in obdržali za določanje obrobne kaljivosti samo modificirano jominy probo. Njihov članek obsega rezultate preizkusov za sedem vrst cementacijskih jekel.

Meyer<sup>6, 7</sup> je z modificirano jominy probo v cementiranem stanju preizkušal kaljivost cementirane skorje in jedra za 11 različnih vrst jekel ameriške in nemške proizvodnje. Šarže je vzel iz redne

proizvodnje, nekatere pa je posebej izdelal v manjših poizkusnih agregatih. Določeval je obrobno kaljivost za nivoje ogljika 1,1 — 1,0 — 0,9 %. Rezultate je vnašal v standardni jominy diagram.

Gurley in Hannewald<sup>8</sup> sta predlagala uporabo diagramov izotrdot za prikazovanje odnosov med ohlajevalno hitrostjo, vsebnostjo ogljika in trdoto cementiranega jekla. Študirala sta obrobno kaljivost jekla SAE 4028. Navajata več prednosti izotrdotnih diagramov za prikazovanje obrobne kaljivosti jekel. V teh diagramih so podane krivulje izbranih trdot v odvisnosti od ogljika in jominy oddaljenosti o dkaljenega čela probe. (Izdelava in uporaba izotrdotnih diagramov bo opisana kasneje).

Ruffle<sup>9</sup> je v obliki diagramov izotrdot podal rezultate svojih raziskav obrobne kaljivosti za 14 britanskih in za 3 ameriška jekla. Njegov članek navaja rezultate preizkušanja tudi za jekli SAE 4620 in SAE 8620, kateri sta preizkušala tudi Halgren in Solecki<sup>10</sup>. Tudi njegovi rezultati obsegajo kaljivost za različne nivoje ogljika.

Halgren in Solecki<sup>10</sup> sta v svojem članku obravnavala obrobno kaljivost za štiri vrste ameriških jekel SAE 4028, SAE 8620, SAE 4620 in SAE 4815. Šarže sta si izbrala v zgornji in v spodnji tretjini območja predpisane kemijske sestave za določeno vrsto jekla.

Poleg tega sta raziskovala vpliv direktnega in indirektnega kaljenja na kaljivost. Rezultate sta podajala v obliki diagramov izotrdot.

Namen raziskav na tem področju ni samo ugotovitev odnosov med obrobno kaljivostjo raznih standardnih vrst jekel, ampak tudi ugotovitev, v kakšnem območju je treba pričakovati obrobno kaljivost pri eni in isti vrsti, če se kemijska sestava in kaljivost jedra spreminjata od zgornje proti spodnji meji območja oziroma pasu kaljivosti. Gotovo je, da so take informacije važne tako za proizvajalca kakor za potrošnika pri izbiri cementacijskega jekla.

Če se lotimo preiskave na tak način, lahko točno preciziramo vpliv kemične sestave na kakovost cementacijskega jekla. Za preiskavo obrobne kaljivosti metoda še ni standardizirana, bilo pa bi to nujno potrebno za zagotovitev reproduktivnosti in neposredne primerjalnosti rezultatov. Dokler postopek preizkušanja obrobne kaljivosti ne bo standardiziran, nam preostane le, da primerjalne preizkuse izvajamo pod čimbolj enakimi pogoji.

To bi bil kratek pregled preizkušanja obrobne kaljivosti cementacijskih jekel. V nadaljnjem se omejimo na eno izmed metod, ki se je pokazala kot najprimernejša. Vsi opisani postopki so si v bistvu zelo podobni in se razlikujejo le v posameznih fazah. Vsi avtorji navedenih člankov so se odločili za določevanje obrobne kaljivosti s standardizirano jominy probo v cementiranem stanju.

## OPIS IZBRANE METODE OBROBNE KALJIVOSTI

### Izbira jekel

Halgren in Solecki<sup>10</sup> sta izbrala štiri vrste cementacijskih jekel. Odločila sta se za komercialne šarže, ker sta smatrala, da dajo komercialne šarže preizkusom večji praktični pomen. Za izbor komercialnih šarž sta vzela kemično sestavo kot osnovni kriterij.

Šarže z močno kaljivostjo sta izbrala na bazi legiranih elementov z vsebnostjo v zgornji tretjini območja kemijske sestave. Šarže s slabo kaljivostjo sta izbrala na bazi legiranih elementov v spodnji tretjini predpisanega območja kemijske sestave. Za vse šarže sta kontrolirala velikost zrna, kemijsko sestavo, kaljivost jedra oziroma osnovnega jekla in zdravost (notranje in zunanje napake). V naslednji tabeli so navedeni podatki preizkušanih jekel:

Oznaka jekla	Kaljivost	Kemična sestava v %						Velikost zrna
		C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	
4028H analizne meje	slaba	0,27	0,82	0,22	0,02	0,07	0,23	7—8
	močna	0,31	0,85	0,32	0,17	0,28	0,24	7—8
	min.	0,24	0,60	0,20	0,25	0,20	0,20	
	maks.	0,30	1,00	0,35	max.	max.	0,30	
8620G analizne meje	slabo	0,20	0,70	0,24	0,50	0,45	0,18	7—8
	močno	0,20	0,84	0,28	0,70	0,56	0,26	7—8
	min.	0,17	0,60	0,20	0,35	0,35	0,15	
	maks.	0,23	0,95	0,35	0,75	0,65	0,25	
4620H analizne meje	slabo	0,18	0,46	0,28	1,68	0,03	0,21	7—8
	močno	0,20	0,64	0,29	1,93	0,21	0,31	6—7
	min.	0,17	0,35	0,20	1,55	0,20	0,20	
	maks.	0,23	0,75	0,35	2,00	max.	0,30	
4815 H analizne meje	slabo	0,16	0,39	0,22	3,3	0,10	0,19	6—8
	močno	0,18	0,54	0,34	3,8	0,23	0,27	6—8
	min.	0,12	0,30	0,20	3,3	0,20	0,20	
	maks.	0,18	0,70	0,35	3,8	max.	0,30	

### Kaljivost jedra

Halgren in Solecki<sup>10</sup> sta kaljivost jedra izbranih šarž določala za dve različni temperaturi avstenitizacije. Po dve jominy probi sta avstenitizirala po 20 minut na 927° C, s čimer naj bi dobila podatke za direktno kaljenje s temperature cementacije. Dve drugi jominy probi sta avstenitizirala po 40 minut na ustreznih naslednjih temperaturah:

SAE 4028 H	830° C
SAE 8620 H	843° C
SAE 4620 H	830° C
SAE 4815 H	816° C

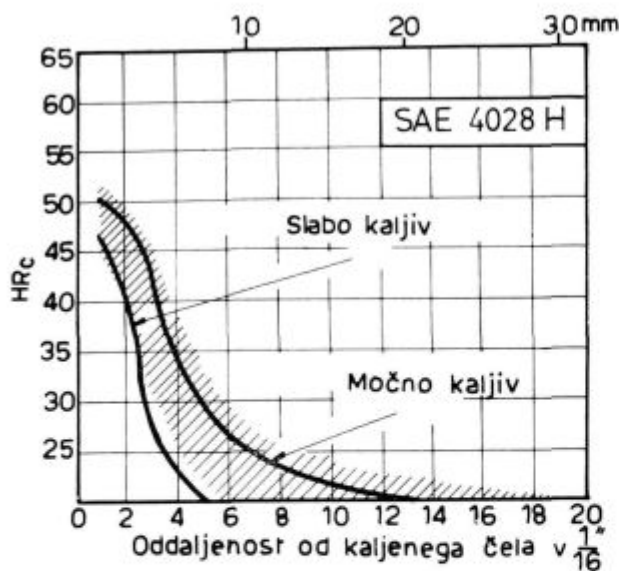
Diagrami na slikah 1—4 prikazujejo kaljivost jedra navedenih ameriških jekel za cementacijo v primerjavi s pasovi garantirane kaljivosti.

### Priprava vzorcev

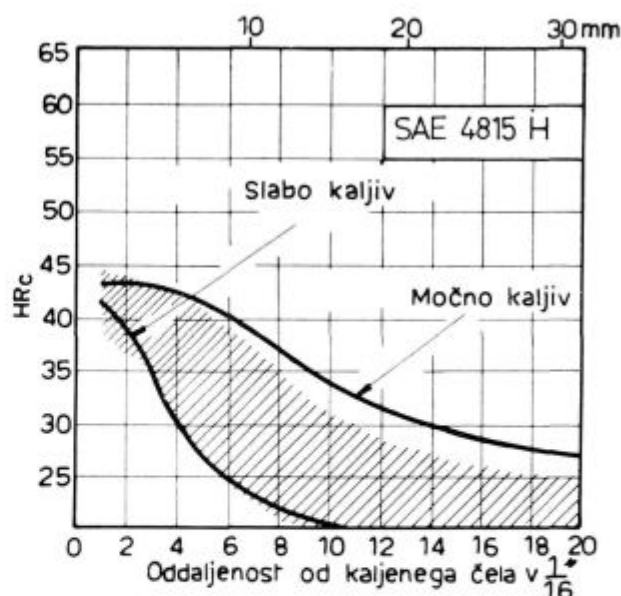
Iz vsake gredice izbranega jekla so skovali po dve palici Ø 32 mm dolžine ca. 1800 mm. Kovane palice so normalizirali. Pri tem so vsa preizkušana jekla enako držali po 1 uro na temperaturi normalizacije 927° C.

Iz normaliziranih palic so izdelali:

- 4 probe Ø 25 mm, dolžine 150 mm za določevanje ogljikovega gradienta;
- 4 standardne jominy probe Ø 25 mm dolžine 100 mm za cementacijo in čelno kaljenje in
- 4 standardne jominy probe za določevanje kaljivosti jedra.



Slika 1



Slika 4

Slike 1-4

Kaljivost jedra, podana za slabo in močno kaljiva jekla v primerjavi s standardnimi pasovi kaljivosti za jekla SAE

Vse probe so bile obdelane s toleranco 0,05 mm na premer. Na vsaki jominy probi so pred cementacijo zbrusili dve vzdolžni ploskvi za določitev površinske trdote cementiranega in čelno kaljenega jekla.

#### Toplotna obdelava prob

##### Postopek cementacije

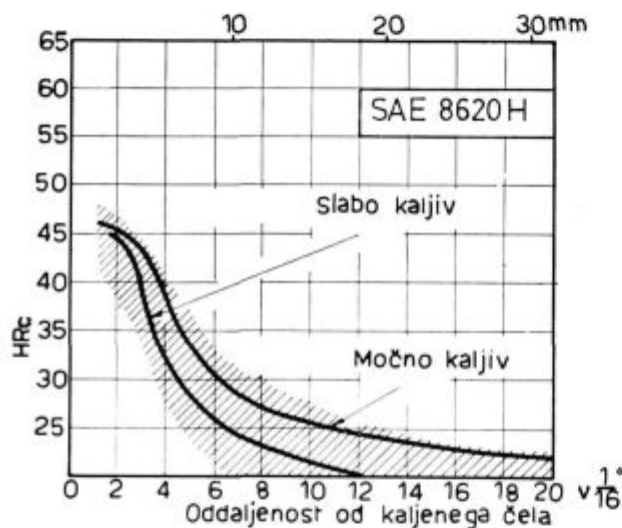
V istem zabožku so vedno istočasno cementirali po dve jominy probi z brušenima ploskvama ter dve probi za določevanje nivojev ogljika. Za cementacijo so uporabljali trdno cementacijsko sredstvo. Čelnih ploskev jominy prob niso zaščitili pred cementacijo. Probe so vložili v cementacijsko sredstvo, tako da jih je obdajal vsaj 12 mm debel sloj cementacijskega sredstva. Vsako probo so cementirali s svežim cementacijskim sredstvom sledeče sestave:

— oglje	50 %
— koks	30 %
— barijev nitrat	12 %
— natrijev nitrat	3 %
— kalcijev nitrat	3 %
— melasno vezivo	2 %

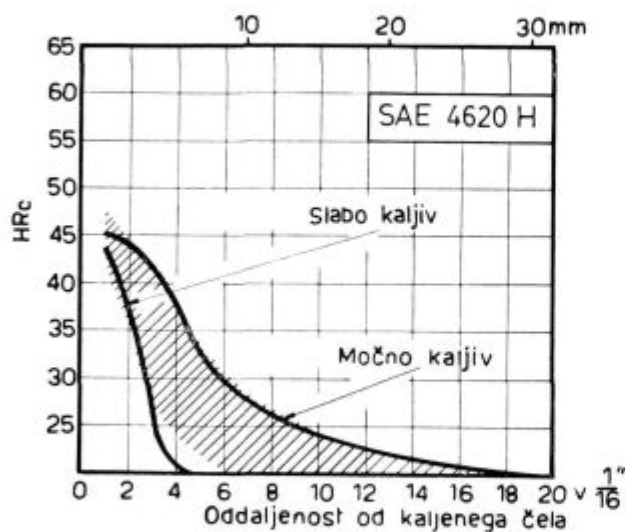
Dobro zamazane zabožke so vložili v peč na temperaturi 427° C ter jih s pečjo ogrevali na temperaturi 927° C. Na tej temperaturi so jih cementirali 18 ur.

##### Kaljenje

Po eno jominy probo so vzeli takoj iz zaboja in jo direktno kalili. Čelno kaljenje je trajalo 10 minut. Ta postopek so imenovali »direktno kaljenje«. Probo za določevanje naogljčenja so ohlajali v dehidratiziranem apnu, da se je počasi ohladilo.



Slika 2



Slika 3

Za tako imenovano »indirektno kaljenje« so po cementaciji obe probi vzeli iz cementacijskega sredstva in jih na zraku ohladili do sobne temperature. Po ohladitvi so obe probi (t. j. probo za določevanje naogljichenja ter probo za čelno kaljenje) segreli na temperaturo za kaljenje jedra v atmosferi plinske cementacije z ogljikovim potencialom 1,15 % ali pa v grafitnem lončku.

Po 40-minutnem džanju na temperaturi so jominy probo 10 minut ohlajali v jominy napravi, probo za določanje ogljika pa so ohladili v dehidratiziranem apnu.

### Določevanje ogljikovega gradienta

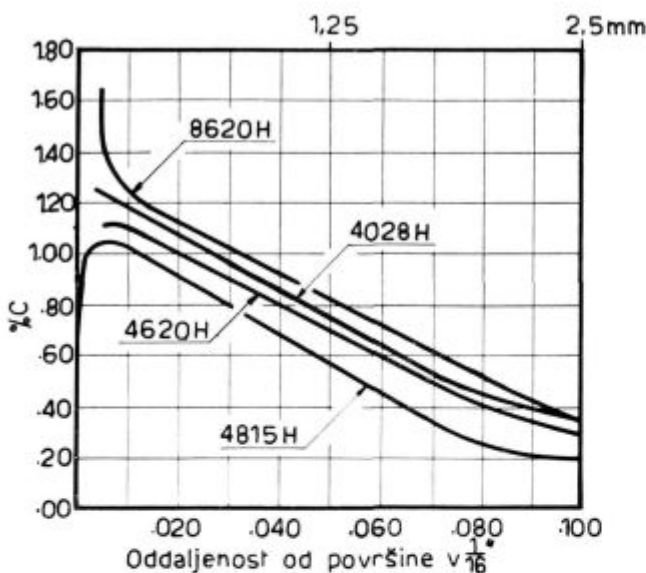
Površinske okside so odstranili s tem, da so palice obrzgalili s paro. Po odstranitvi oksidov so palice stružili:

- do 0,48 mm v stopnjah po 0,12 mm
- nato pa do globine 3,0 mm v stopnjah po 0,25 mm.

Vse poizkuse so delali v dveh paralelkah. Poprečne vrednosti za ogljik so vnašali za vsako probo posamezno v diagram odvisnosti procenta ogljika in globine cementacije. Iz teh diagramov so določili globine, ustrezne sledečim nivojem ogljika:

1,10, 1,00, 0,90, 0,80, 0,70, 0,60, 0,50, 0,40, in 0,30 odstotka za vsako palico.

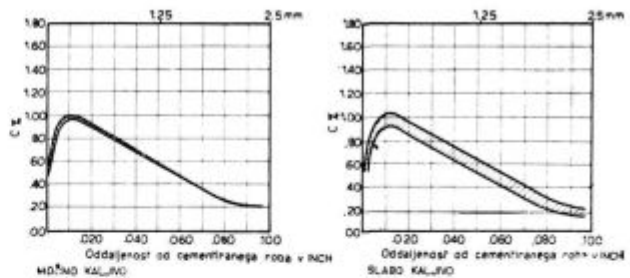
Poprečni ogljikovi gradienti za šarže z visoko kaljivostjo vseh preizkušanih jekel so podani v sliki 5 (podatki pripadajo jominy probam, ki so bile direktno kaljene).



Slika 5

Ogljikovi gradienti za močno kaljiva jekla, cementirana pri 927° C

Sliki 6 in 7 predstavljata najmanjše in največje trosenje ogljikovega gradienta dveh paralelnih prob za določanje ogljika.



Sliki 6 in 7

Minimalna in maksimalna odstopanja ogljikovega gradienta med dvema probama cementiranega jekla SAE 4815 H

### Določanje trdote

Trdote površine niso podane zaradi različnih trdot in različnih vsebnosti ogljika ter različnih rezultatov med posameznimi laboratoriji. Do takih prihaja zaradi rahlega razogljichenja ali naogljichenja na površini pri jemanju prob iz zabojčkov ali pa pri ponovnih ogretyjih prob v različnih atmosferah na temperaturi kaljenja. Ugotovili so, da se vpliv te napake na obrobno kaljivost plasti pod površino lahko zanemari. Na vseh jominy probah so nato zelo pazljivo zbrusili nadaljnje ploske za izbrane nivoje ogljika od 1,1 % po 0,1 % C do vsebnosti 0,3 % C.

Držali so se pravila, da so pri jeklu SAE 8620 H odbrusili na vsaki ploskvi za direktno kaljenje probe najmanj 0,50 mm in za indirektno kaljene probe vsaj 0,76 mm, preden so merili trdoto na drugem nižjem nivoju ogljika na isti brušeni ploskvi. Za ostale tri vrste cementacijskega jekla so odbrusili še več, preden so merili trdote na naslednjem nivoju ogljika (približno 1,2 mm).

Trdoto so merili vzdolž jominy probe v presledkih 1,5 mm izmenično z rockwell A in rockwell 15 N pri jeklih SAE 8620 H ter 4815 H in z vickers 10 kg v intervalih 1,5 mm pri jeklih SAE 4028 H ter 4620 H za nivoje ogljika 1,00 %, 0,80 % in 0,40 % C. Na ostalih nivojih so merili le rockwell A.

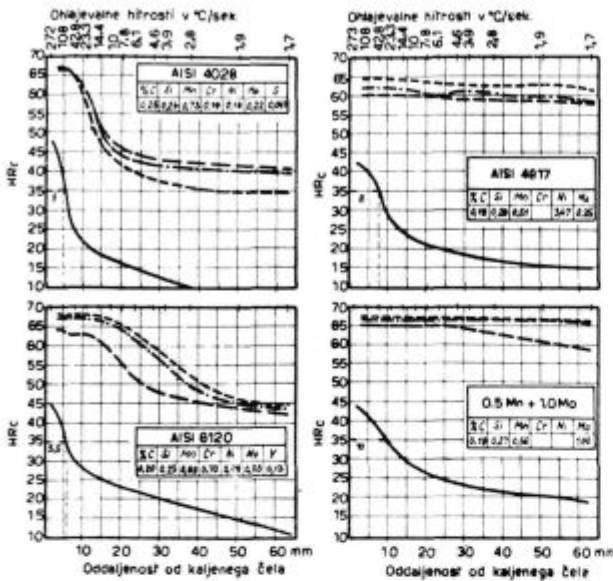
### Iz vrednotenje in prikazovanje rezultatov obrobne kaljivosti

Do nedavna so kot najbolj uporabno in najprimernejšo obliko prikazovanja obrobne kaljivosti smatrali diagrame z jominy krivuljami za posamezne nivoje ogljika. Način prikazovanja obrobne kaljivosti s pomočjo jominy krivulj za različno kaljiva jekla prikazujejo diagrami na sliki 8.

S pomočjo takih diagramov lahko ločimo jekla v grupe, ki ob razmeroma isti začetni trdoti dobro, srednje ali slabo prekaljijo.

Nelegirana cementacijska jekla in jekla z vsebnostjo mangana do 0,9 % ter molibdena do 0,4 % kažejo slabo prekaljivost. Poprečna oddaljenost prevojnne točke na jominy krivulji jedra znaša približno 5 mm. Za primer sta prikazana leva diagrama na sliki 8.

V grupo jekel z dobro prekaljivostjo štejemo krom-nikelj-molibdenova jekla, krom-mangan-molibdenova, krom-nikeljeva, krom-molibdenova jekla z vsebnostjo mangana nad 0,9 % ali molibdena nad 0,4 %. Desna diagrama na sliki 8 prikazujeta dve vrsti jekel te skupine.



Slika 8

Obrobna kaljivost v obliki Jominy krivulj Jominy diagram čelno kaljene cementirane probe iz močno kaljivega jekla SAE 4620 H

Podajanje rezultatov obrobne kaljivosti v obliki jominy krivulj postane pri večjem številu ogljikovih nivojev nepregledno. V takih primerih je mnogo boljše podajanje rezultatov v obliki izotrdotnih diagramov, ker so analize in zaključki o obrobni kaljivosti na podlagi teh rezultatov mnogo bolj pregledni.

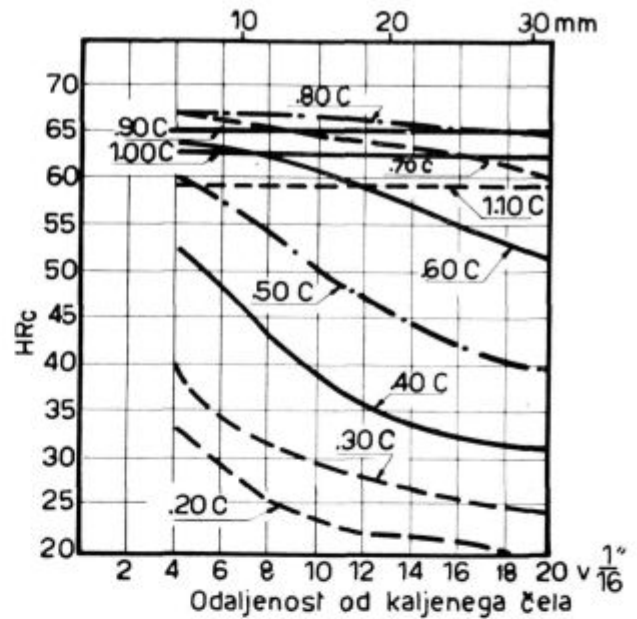
Sliki 9 in 10 kažeta rezultate obrobne kaljivosti v obliki Jominy krivulj. Pri tem sta dve možnosti.

»Kolikor so najprej znane vsebnosti ogljika v različnih globinah, se iz krivulje naogljichenja očita potrebné globine brušenja jominy prob za izbrane nivoje ogljika. Tako dobimo jominy krivulje za različne vsebnosti ogljika, kakor kaže slika 9.

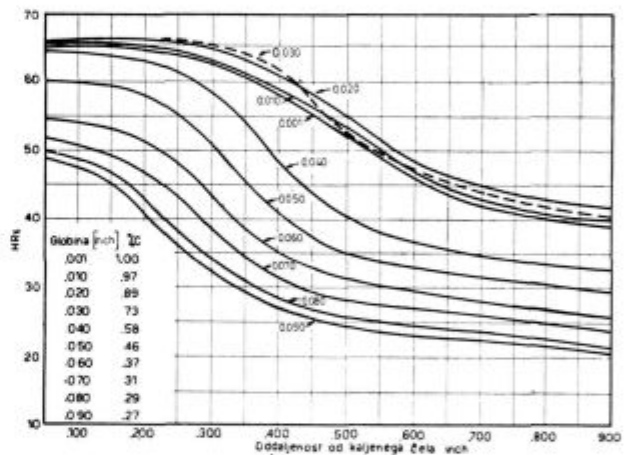
Druga možnost je, da jominy probe zbrusimo na enakomerne globine in nato določimo tem globinam ustrezne vsebnosti ogljika. Tako dobimo obliko diagrama na sliki 10, kjer so ob posameznih krivuljah označene ustrezne globine cementirane plasti.

Drugi način je za tekočo kontrolo bolj praktičen, ker se jominy probe vedno enako brusijo in ker je izvajanje poizkusa neodvisno od kemijskih analiz.

Oba diagrama sta zaradi večjega števila ogljikovih nivojev preveč kompleksna in nepregledna za primerjalne analize. Diagramu na sl. 9 ustreza



Slika 9  
Direktno kaljenje  
Vsebnosti ogljika 0,2–1,10 %



Slika 10

Primer diagrama kaljivosti cementiranega jekla v obliki Jominy krivulj za določene globine

levi izotrdotni diagram na sliki 17. Na prvi pogled se zdi izotrdotni diagram morda nekoliko kompliciran, ko pa ga študiramo, nam da zelo jasno sliko vseh sprememb pri različnih termičnih obdelavah, še večje razlike pa so pri različnih vrstah cementacijskega jekla.

Rezultati obrobne kaljivosti so s pomočjo trdot, merjenih po metodi rockwell A, podani kot srednje vrednosti paralelk grafično v obliki izotrdotnih krivulj. Pri oddaljenosti od kaljenega čela (J — položaj), ki so manjše od J4 (t. j. 4/16" = 6,5 mm), so krivulje podane črtkano. Potegnjene so namreč približno po oceni, ker čelo jominy

prob ni bilo zaščiteno pred cementacijo in se zato njihov ogljikov gradient v bližini kaljenega čela nekoliko razlikuje od srednje vrednosti, ugotovljene na palici za določanje ogljika. Ameriških raziskovalcev na področju obrobne kaljivosti niso zadovoljili rezultati, prikazani z jominy krivuljami. Zato sta predvsem Gurley in Hannewald<sup>8</sup> iskala novo obliko podajanja obrobne kaljivosti, ki bi olajšala praktično uporabo rezultatov. Odločila sta se za podajanje rezultatov obrobne kaljivosti v obliki diagramov izotrdot. Pri tem sta privzela dve predpostavki:

— enake ohlajevalne hitrosti na enakih oddaljenostih od kaljenega čela jominy probe,

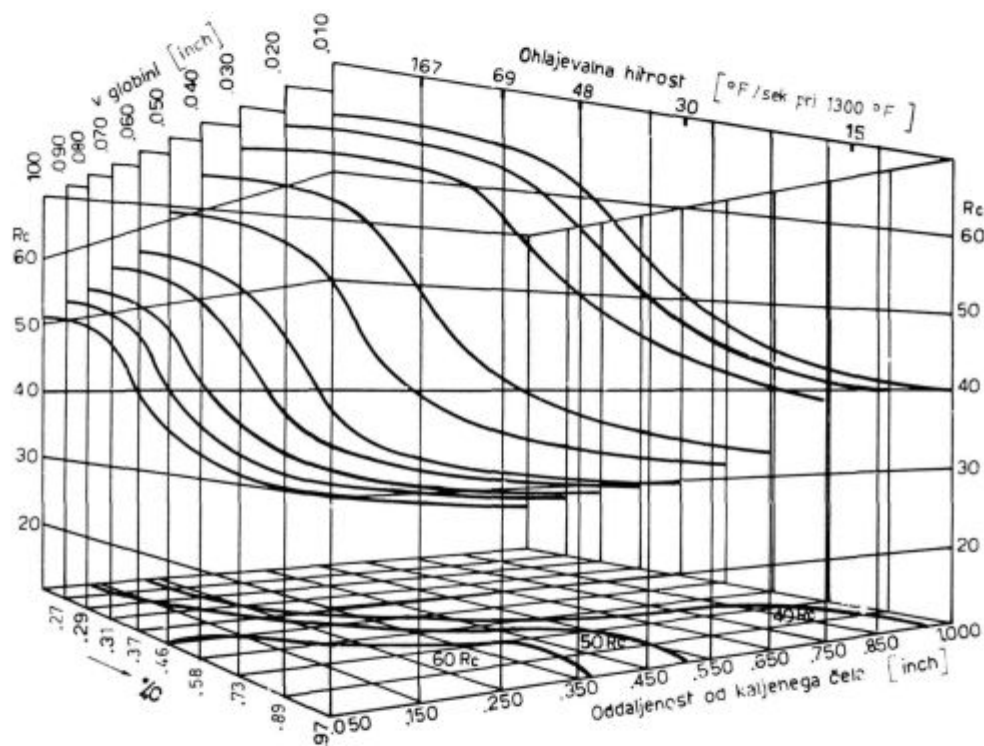
— konstantne vsebnosti ogljika na določeni globini cementirane plasti.

Ti dve predpostavki omogočata študij obrobne kaljivosti v sledeči obliki:

— pri posameznih oddaljenostih od kaljenega čela cementirane jominy probe ugotavljamo vpliv spremenjenih vsebnosti ogljika po preseku ob konstantni ohlajevalni hitrosti z merjenjem trdot postopno odbrušenih plasti,

— z merjenjem trdot vzdolž jominy probe na posameznih konstantnih nivojih ogljika vrednotimo vpliv ohlajevalne hitrosti na posamezne plasti cementirane skorje.

Tako zbrane rezultate lahko prikažemo s prostorskim diagramom, kakršnega prikazuje za primer slika 11.



Slika 11

Primer diagrama kaljivosti za cementirano jeklo AISI 4028 v obliki prostorskega diagrama (A. E. Gurley, C. R. Hannewald)

V tem diagramu so na osi X nanesene oddaljenosti od kaljenega čela oziroma ohlajevalne hitrosti. Na osi Y so trdote v rockwellu in na tretji osi Z so nanesene vsebnosti ogljika oziroma globine struženja.

Na ta način so v enem diagramu zajeti vsi trije faktorji, ki nas zanimajo:

Vsebnost ogljika — ohlajevalna hitrost — trdota

Prostorski diagrami so nekoliko težavni za konstruiranje in nepraktični za odčitavanje pri praktični uporabi. Omenjena avtorja sta želela tak dia-

gram poenostaviti. To sta izvedla tako, da sta os Y presekala na različnih nivojih (t. j. pri različnih trdotah) z ravnino, ki je vzporedna z ravnino XZ. Taka ravnina, izbrana npr. pri 60 Rc, preseka pri tej trdoti vse jominy krivulje za različne vsebnosti ogljika pri različnih oddaljenostih od kaljenega čela. Vsa ta presečišča se projicira na ravnino XZ. Izotrdotna krivulja poveže vsa projicirana presečišča, ustrezna trdoti 60 Rc, v ravnini XZ, ki predstavlja medsebojne odnose vsebnosti ogljika in oddaljenosti od kaljenega čela. Enako se konstruira ostale izotrdotne krivulje za poljubno izbrane



trdote. To je preprosta in praktična metoda prikazovanja kompleksnih podatkov o kaljivosti cementiranega jekla.

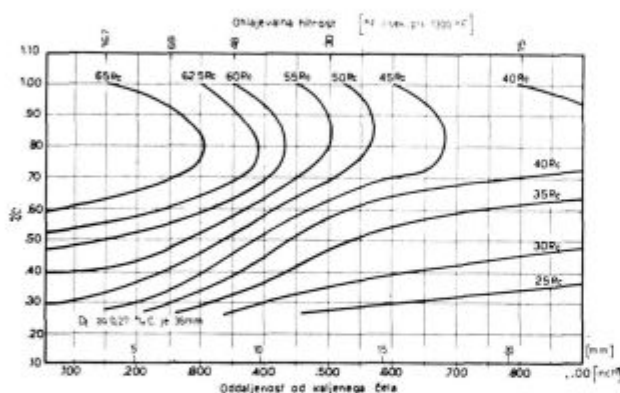
Glavna prednost tega načina je v tem, da se odvisnost vseh treh faktorjev prikaže v ravnini. Izdelava in praktičnost izotrdotnih diagramov v tej obliki je prikazana na sliki 12.

X <sub>C</sub>	Oddaljenost od kaljenega čela v $\frac{1}{16}$ "																			globina inche					
	05	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95		100				
100	65	65	65	64	63	62	60	57	55	52	49	45	43	42	41	40	39	38	38	38	.001				
97	65	65	65	65	64	63	62	59	57	53	49	47	47	42	41	41	40	39	38	38	.010				
89	66	66	66	66	65	64	63	61	59	55	52	48	46	44	43	43	42	41	40	39	.020				
73	66	66	66	66	65	64	62	57	53	49	47	45	44	43	42	41	40	39	38	38	.030				
58	65	65	64	63	62	61	58	54	50	46	43	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	.040	
46	60	60	59	58	56	54	51	48	45	41	37	35	34	33	32	32	31	31	30	29	28	28	28	.050	
37	55	54	53	52	49	46	44	41	38	35	33	31	30	29	28	27	26	26	25	25	24	24	24	.060	
31	52	51	49	47	44	41	39	36	34	31	29	28	27	27	26	25	25	24	24	23	23	23	23	.070	
29	50	49	47	45	42	40	37	35	33	31	29	28	27	26	25	24	24	23	23	22	22	21	21	20	.080
27	49	47	46	44	41	39	36	34	32	29	27	25	24	24	23	22	22	21	21	21	20	20	20	19	.090

Slika 12  
Ilustracija izdelave izotrdotnega diagrama  
(A. E. Gurley, C. R. Hannewald)

To je pravzaprav tabela z dvema komponentama, od katerih je ena oddaljenost od kaljenega čela, druga pa globina struženja oziroma vsebnost ogljika. V vodoravnih vrstah te tabele so vpisane za konstantni nivo ogljika izmerjene trdote pri posameznih oddaljenostih od kaljenega čela probe. Tako je ponazorjen vpliv ohlajevalne hitrosti na trdoto določene plasti cementirane skorje. V navpičnih kolonah je podana odvisnost trdote od vsebnosti ogljika oziroma globine struženja za konstantno ohlajevalno hitrost oziroma za isto oddaljenost od kaljenega čela probe.

Slika 12 kaže pripravo za konstrukcijo diagrama, slika 13 pa končno obliko diagrama izotrdot za obrobno kaljivost cementiranega jekla.



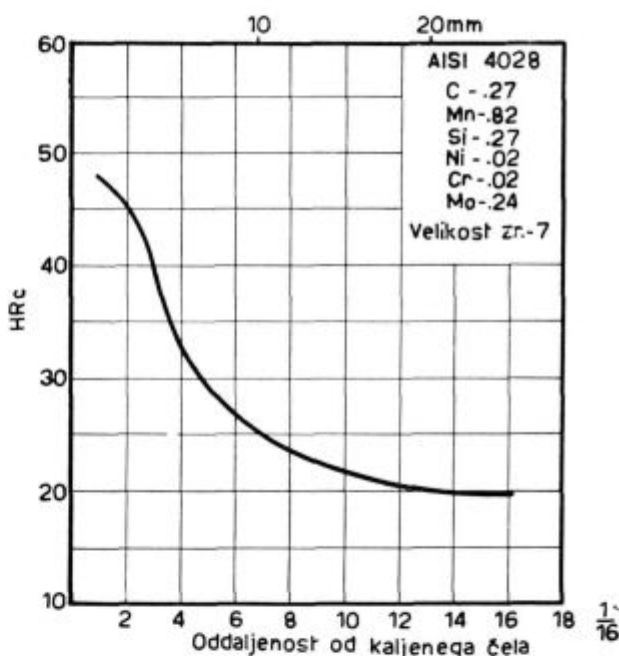
Slika 13  
Primer diagrama kaljivosti cementiranega jekla AISI 4028  
v obliki izotrdot  
(A. E. Gurley, C. R. Hannewald)

Kaljivost jedra je v diagramu izotrdot podana na dva načina:

— Prva metoda: vrednost idealnega kritičnega premera  $D_c$  je podana v levem spodnjem kotu diagrama. Ta vrednost je izračunana na podlagi kemijske sestave in velikosti zrna 7 po ASTM. V raziskovalnem odelku US Steel Corporation so razvili za ta preračunavanja posebno pomično računalo.

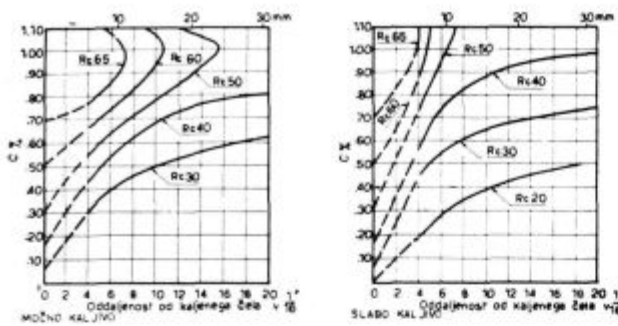
— Druga metoda: pri tej metodi se poslužujejo neposrednega vnašanja rezultatov preizkusa kaljivosti osnovnega jekla v diagram.

Trdota ob presečišču vsake izotrdotne krivulje z vsebnostjo ogljika osnovnega jekla daje vrednost trdot pri določenih oddaljenostih od kaljenega čela. Te vrednosti se dobro približujejo dejanskim rezultatom kaljivosti, ki so prikazani z jominy krivuljo osnovnega jekla na sliki 14. Razlike, ki jih često ugotovimo, so posledica preračunavanja trdot po Vickersu v trdote po Rockwellu C.



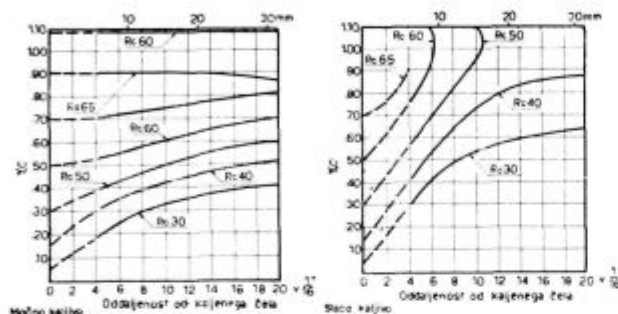
Slika 14  
Kaljivost jedra

Izotrdotni diagrami na slikah 15—18 podajajo rezultate obrobne kaljivosti za direktno kaljene probe vseh preizkušanih vrst jekel. Primerjava originalnih podatkov kaljivosti kaže, da se 94 % vnesenih točk ujema neposredno ali pa z odstopanjem v mejah 0,01 % C s krivuljami diagramov. Maksimalna odstopanja so v velikosti 0,03 % C. Največja še upoštevana oddaljenost od kaljenega čela je položaj J 20 (t. j. 20/16" = 31,75 mm), ker so raziskovalci smatrali, da je taka informacija s praktičnega stališča zadostna.



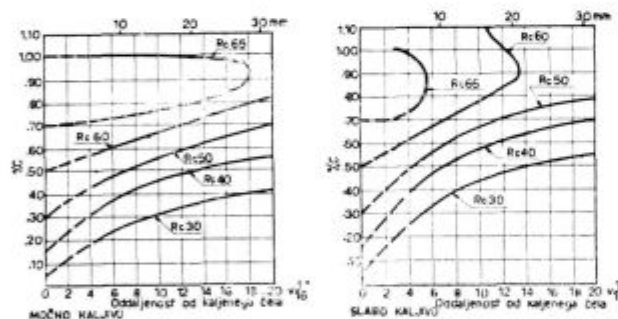
Slika 15

Izotrdotni diagram cementiranega in direktno kaljenega jekla SAE 4028 H



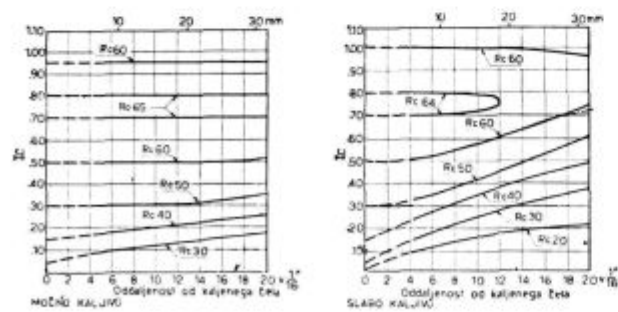
Slika 16

Izotrdotni diagram cementiranega in direktno kaljenega jekla SAE 8520 H



Slika 17

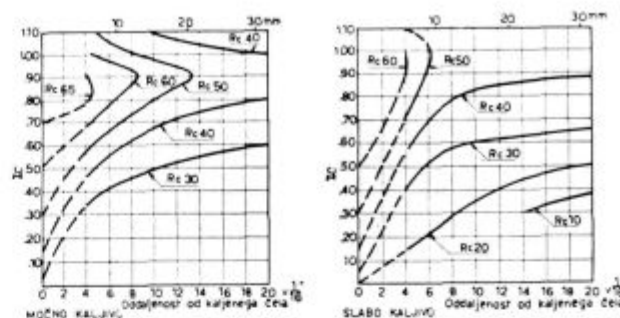
Izotrdotni diagram cementiranega in direktno kaljenega jekla SAE 4620 H



Slika 18

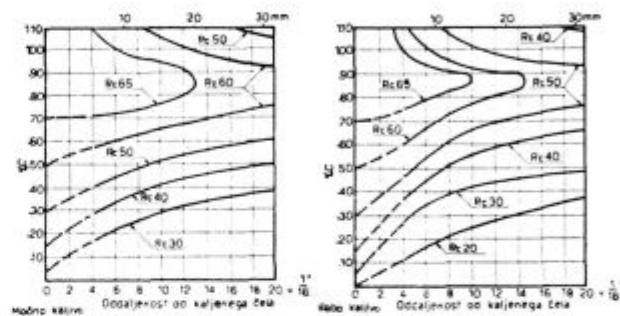
Izotrdotni diagram cementiranega in direktno kaljenega jekla SAE 4815 H

Slike 19—22 kažejo analogne diagrame izotrdot za indirektno kaljene probe.



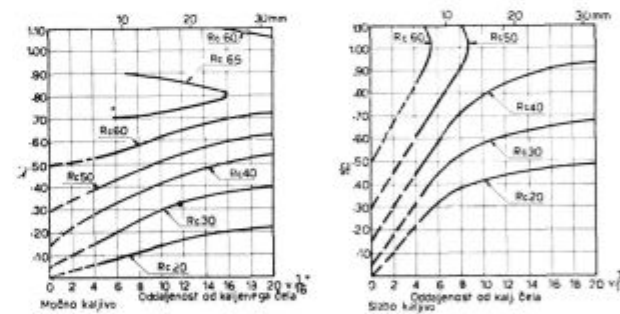
Slika 19

Izotrdotni diagram cementiranega, ponovno ogretega in kaljenega jekla SAE 4028 H



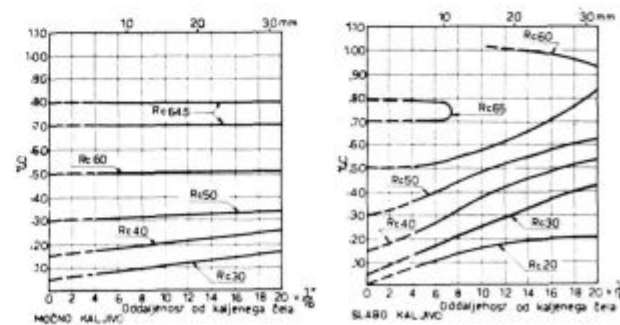
Slika 20

Izotrdotni diagram cementiranega, ponovno ogretega in kaljenega jekla SAE 8620 H



Slika 21

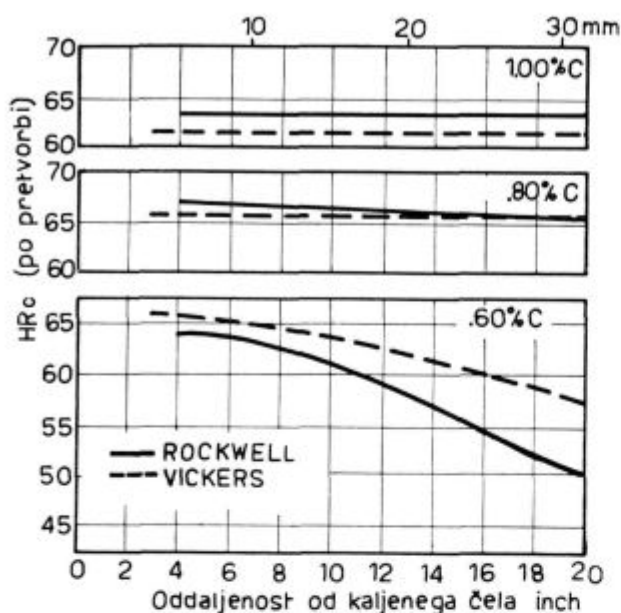
Izotrdotni diagram cementiranega, ponovno ogretega in kaljenega jekla SAE 4620 H



Slika 22

Izotrdotni diagram cementiranega, ponovno ogretega in kaljenega jekla SAE 4815 H

Slika 23 prikazuje tipične razlike trdot merjenih na različnih aparatih: rockwell A in vickers 10 kg za tri različne nivoje ogljika.



Slika 23

Razlika kaljivosti cementirane plasti pri treh vsebnostih ogljika zaradi različnih metod merjenja. Rockwell A in HV<sub>10</sub> kg za jeklo SAE 4620 H — močno kaljivo in direktno kaljeno (E. A. Soletcki, J. A. Halgren)

### Ugotovitve raziskav

#### Kemijska sestava

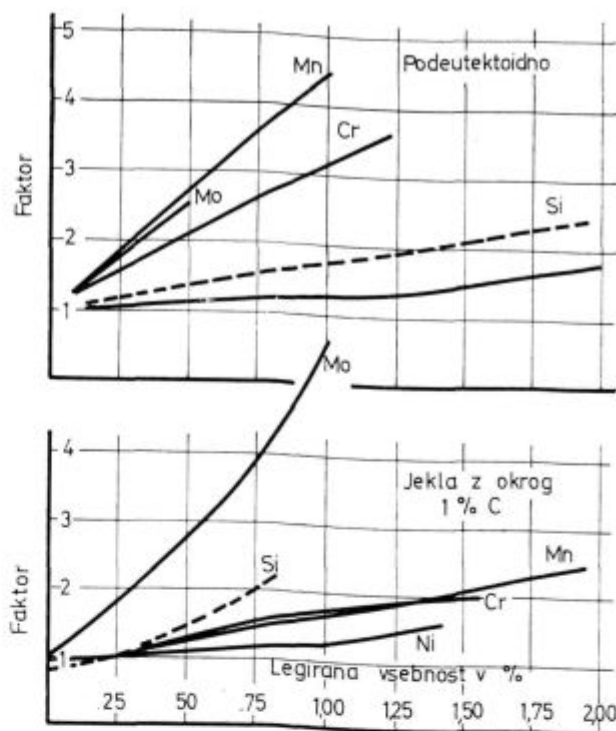
Kontrola kemijske sestave vseh osmih šarž preizkušenih jekel je pokazala, da vse šarže ustrezajo predpisanim območjem kemijskih vsebnosti, legirnih elementov in da so šarže z nizko kaljivostjo v spodnji tretjini območja ter šarže z visoko kaljivostjo v zgornji tretjini predpisanega kemijskega območja. Vsebnosti ogljika pri tem niso upoštevali.

#### Kaljivost

Pri vseh štirih vrstah jekel je opaziti tendenco nizko kaljivih šarž (t. j. tistih, ki imajo kemijsko sestavo v spodnji tretjini kemijskega območja), da se približujejo spodnji meji H pasu za kaljivost jedra. Pri šaržah, ki imajo analizo v bližini zgornje meje predpisanega kemijskega območja, ležijo jominy krivulje v bližini zgornje meje H pasu. Podobno kot pri jedru opazimo tudi pri kaljivosti cementirane plasti, da so v diagramih izotrdot krivulje močno kaljivih šarž bolj položne kot krivulje slabo kaljivih šarž.

#### Vpliv legirnih elementov

Za oceno vpliva legirnih elementov na kaljivost jedra bi bilo potrebno odstraniti ali vsaj zmanjšati vpliv vsebnosti ogljika na kaljivost jedra. Razni raziskovalci<sup>11, 12</sup> so ugotovili za legirne elemente faktorje kaljivosti (glej sliko 24).



Slika 24

Faktorji za izračunavanje kaljivosti (C. F. Jatzak, D. J. Girardi)

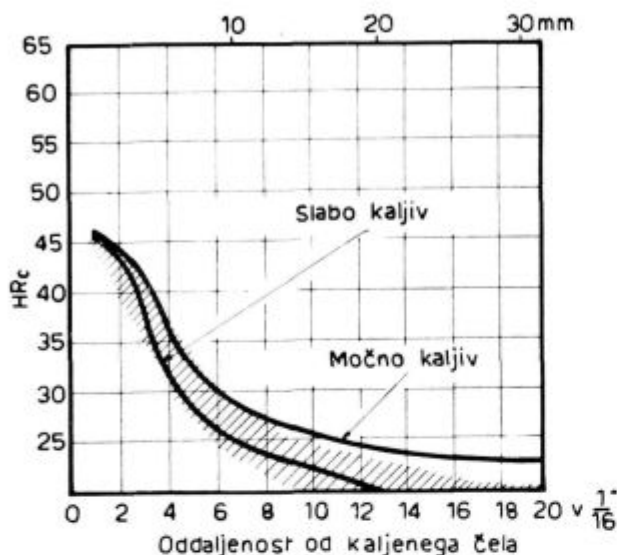
Na tak način bi mogli ugotoviti približni vpliv legirnih elementov na kaljivost jedra le pri seriji jekel v ločenih območjih ogljika. V obravnavanih raziskavah so imeli na razpolago tako serijo šarž pri jeklu SAE 8620 H. Ta aproksimacija potem ustreza trosenju kaljivosti jedra, ki je ugotovljena pri jeklu SAE 8620 H za isti nivo ogljika. Prav to pa lahko upravičeno precej kritiziramo. Eden najtehtnejših pomislekov je različna vsebnost prisotnih legirnih elementov v jeklu, kar vpliva na kaljivost. Meje pasov kaljivosti niso določene samo z vsebnostjo ogljika, ampak predstavljajo kombinirani in istočasni vpliv ogljika ter legirnih elementov na kaljivost. Na kaljenem delu se vertikalna širina pasu pripisuje odločilnemu vplivu ogljika<sup>13</sup>.

Kljub vsem kritikam uvedba tega načina analiziranja kaljivosti jedra nekega jekla z upoštevanjem minimalnega in maksimalnega pasu kaljivosti za posamezne vsebnosti ogljika pri danem jeklu le daje podrobnejši vpogled v problematiko primerjave kaljivosti jedra in skorje.

Slika 25 predstavlja kaljivost jedra za šarži SAE 8620 s slabo in z močno kaljivostjo. Obe imata enako vsebnost ogljika 0,20 %.

Pas kaljivosti, ki obsega slabo in močno kaljive šarže z istim ogljikom, je mnogo ožji od standardnega SAE pasu istega jekla. To je razumljivo, ker so hoteli z izključitvijo sprememb ogljika pokazati samo vpliv legirnih elementov na kaljivost jedra.

Dokazano je s praktičnimi poizkusi, da se karakteristike kaljivosti jedra ne ujemajo vedno s karakteristikami kaljivosti cementirane skorje. Zato je potrebno tudi s praktičnega stališča poleg preizkušanja kaljivosti jedra preizkušati tudi kaljivost skorje s pomočjo obrobne kaljivosti.



Slika 25

Kaljivost jedra za slabo in močno kaljivo jeklo v primerjavi s pasom kaljivosti za jeklo SAE 8620 H z vsebnostjo ogljika 0,20 %

### Ogljikov gradient

Podatki na sliki 5 potrjujejo informacije o vsebnosti ogljika na površini in o doseženi penetraciji ogljika v jeklih z različnimi vsebnostmi legirnih elementov, posebno niklja in kroma, če so ta izpostavljena istemu ogljikovemu potencialu. Krom pospešuje penetracijo in povečuje vsebnost ogljika na površini. Povečanje vsebnosti niklja zmanjšuje penetracijo in znižuje vsebnost ogljika na površini. Vsebnosti ogljika na površini in v neposredni bližini površine so preveč različne, da bi lahko zanesljivo uporabljali rezultate meritev trdote na površini za primerjavo karakteristik teh jekel v cementiranem stanju.

Območje rezultatov paralelnih prob za naogljivenje je prikazano na slikah 6 in 7. Iz primerjav obeh slik vidimo jasno zahtevo po veliki pazljivosti in točnem določanju vsebnosti ogljika tik pod površino. Pri paralelkah so odstopanja ugotovili za 0,18 % C na isti globini pod površino. Nekateri avtorji navajajo še mnogo večje razlike! Odstopanja v nižjih slojih so precej manjša.

### OBROBNA KALJIVOST

Pri vseh diagramih izotrdot bodisi s slabo ali z močno kaljivostjo opazimo neko skupno karakteristiko:

Vse izotrdotne krivulje tvorijo neki vrh oziroma maksimalno jominy oddaljenost izotrdotne krivulje pri določenem nivoju ogljika, ki je za isto jeklo pri vseh krivuljah približno enak. Zato lahko vsebnost ogljika, ki pripada temu maksimumu izotrdotne krivulje, smatramo za eno od najpomembnejših karakteristik jekla pri obrobni kaljivosti. Ta maksimum obenem določa tisti nivo ogljika, ki edini omogoča doseganje popolne martenzitne strukture na površini cementirane plasti.

Nagib izotrdotnih krivulj je merilo za kaljivost jekla. Čim manjši so nagibi, tem močnejša je kaljivost jekla.

Če sedaj še enkrat pogledamo diagrame izotrdot na slikah 15—22, vidimo, da nam že na prvi pogled omogočajo oceno splošne kaljivosti cementacijskega jekla.

### PRAKTICEN POMEN IN UPORABA IZOTRDOTNIH DIAGRAMOV

Glavni poudarek izotrdotnih diagramov je na trdoti. Faktorji, ki odločajo o trdoti, so: ohlajevalna hitrost, vsebnost ogljika in kaljivost. Trdota martenzitne strukture je odvisna od vsebnosti ogljika v trdni raztopini. Podobno je količina ogljika v raztopini odvisna od kaljivosti oziroma od ohlajevalne hitrosti. Ti faktorji učinkujejo v določenih mejah in njihovi vplivi so jasno prikazani v diagramih izotrdot.

Iz teoretičnih osnov je znano, da povečanje ohlajevalne hitrosti zvišuje trdoto jekla. Najvišjo trdoto doseže jeklo pri ohlajevanju s kritično ohlajevalno hitrostjo. Povečanje ohlajevalne hitrosti nad kritično mejo ne omogoča nadaljnega zvišanja trdote.

Te odnose lahko praktično študiramo in prikazujemo z izotrdotnimi diagrami.

Oglejmo si v zvezi s tem vpliv ogljika na trdoto pri konstantni ohlajevalni hitrosti na primeru diagram slika 13.

V tem diagramu vzemimo oddaljenost od kaljenega čela 0,4" (ca. 10 mm) in analizirajmo vpliv ogljika na trdoto.

Zvišanje vsebnosti ogljika povzroča naraščanje trdote do neke maksimalne vrednosti. Nadaljnje zviševanje ogljika nad to vsebnostjo je s stališča dosežene trdote brez uspeha. Nasprotno, zvišanje vsebnosti ogljika preko optimalne vrednosti 0,80—0,85 % za jeklo AISI 4028 celo zniža trdoto. To znižanje je posledica zaostalega avstenita pri povečanih ohlajevalnih hitrostih. Vsebnosti ogljika nad 0,85 % pri tem jeklu povzročijo nižje trdote tudi pri relativno majhnih hitrostih. V teh primerih se znižanje trdote pripisuje transformacijskim produktom, zaostalemu avstenitu ali njihovim kombinacijam.

Vpliv ogljika na kaljivost se lahko študira z uporabo diagramov izotrdot. To se lahko izvrši

z izbiro krivulje konstantne trdote, po kateri se zasleduje vpliv ogljika na oddaljenost od kaljenega čela oziroma na ohlajevalno hitrost.

Na sliki 13 dobimo trdoto 55 Rc za 0,4 % C pri 1,2 mm od kaljenega čela. S povišanjem vsebnosti ogljika dosežemo 55 Rc pri manjši ohlajevalni hitrosti.

Najmanjša ohlajevalna hitrost je za dosego trdote 55 Rc potrebna pri cca 0,85 % C. Ta ohlajevalna hitrost ustreza oddaljenosti 12 mm od kaljenega čela. Zvišanje ogljika nad 0,85 % C manjša kaljivost in za dosego iste trdote je zopet potrebna večja ohlajevalna hitrost.

Uporaba informacij iz laboratorijskih rezultatov neposredno v proizvodnji predstavlja često velik problem. Stopnja težavnosti je odvisna od točnosti informacij oziroma rezultatov, pravilne analize problema in od metode prikazovanja rezultatov preizkušanja.

Koristne podatke o kaljivosti neke šarže izbranega jekla lahko dobimo s pomočjo jominy poizkusa. Zbiranje informacij za različne šarže predstavlja merilo, ki omogoča metalurgu primerjave ekvivalentnih ohlajevalnih hitrosti in njim ustreznih trdot v cementirani plasti.

V praksi želimo vedno enako kvalitetno cementirano plast. Zato se zahteva kontrola trdote cementirane in kaljene plasti na površini in po celotni cementirani globini.

Dosežena trdota v cementirani plasti, ohlajeni s konstantno ohlajevalno hitrostjo, je odvisna od vsebnosti ogljika in kaljivosti osnovnega jekla. Ti vplivi so lepo vidni iz izotrdotnih diagramov, izdelanih s pomočjo jominy poizkusa cementiranih prob.

Vpliv dodanega ogljika na trdoto je odvisen od specifične kemijske sestave oziroma vrste jekla. Zato je potrebno zbirati podatke o kaljivosti v cementiranem stanju za isto vrsto jekla, kakršno se uporablja v proizvodnji.

Kaljivost cementacijskih jekel se povečuje z dodanim ogljikom. Ta vpliv povišanja vsebnosti ogljika se povečuje do omenjenega maksimuma, sl. 13. Informacijo o najugodnejši vsebnosti ogljika na površini za dosego največje trdote in kaljivosti pri cementiranih delih za določeno vrsto jekla dobimo neposredno iz izotrdotnega diagrama, če v njem odčitamo tisto vsebnost, ki pripada maksimumu izotrdotnih krivulj.

Večinoma se pri cementaciji predpisujeta trdota površine in efektivna globina cementacije, ki je običajno definirana s trdoto 500 HV ali 50 Rc. Zato mora gradient ogljika zadovoljiti vsaj ti dve zahtevi. Potrebno ohlajevanje in območje vsebnosti ogljika na površini se lahko določi iz diagrama izotrdot. Take informacije potrebujemo za izpolnitev zahtev neposredno v proizvodnji in na ta

način urejamo in kontroliramo postopek cementacije. Koncentracijo ogljika v cementacijskem sredstvu, čas, temperaturo in ohlajevalno hitrost cementacije v praksi je treba urediti tako, da se dobljene vrednosti čim bolj približujejo predpisanim. Sprememba in ureditev cementacijskih pogojev ni težak problem za izkušenega mojstra. Problem je težavnejši tedaj, ko se istočasno cementirajo kosi različnih oblik, debelin in velikosti, izdelani iz jekel z različnimi cementacijskimi karakteristikami. Zato se mora istočasno cementirati le tista jekla, ki imajo slične cementacijske lastnosti glede vpliva naogljichenja na trdoto. Problem uporabe tehničnih informacij, dobljenih iz izotrdotnih diagramov v proizvodnji, ni tako težaven, kakor bi na prvi pogled izgledal. Kaljivost, vsebnost ogljika in ohlajevalne hitrosti za dosego katerekoli trdote v okviru določenih mej se lahko dobi iz diagrama izotrdot z neposrednim odčitavanjem.

Vzemimo za primer praktično uporabo diagrama izotrdot v praksi pri cementaciji zobatih koles.

Najprej je treba analizirati vse zahteve, ki jih mora cementirani komad zadovoljiti:

- trdota mora biti zadovoljiva,
- cementirana plast mora biti dovolj globoka,
- v cementirani plasti mora biti ugoden potek vsebnosti ogljika.

Zadovoljivo trdoto dosežemo s tem, da dosežemo na površini ogljik, ki ima optimalno trdoto pri vseh ohlajevalnih hitrostih za določeno vrsto jekla. To optimalno vsebnost ogljika dobimo neposredno iz izotrdotnega diagrama.

Zaželeno območje vsebnosti ogljika lahko dosežemo z izkušnjami v praksi. Vsebnost ogljika izven tega območja na površini kaže na pomanjkanje potrebne kontrole in trdota, ki jo jeklo v takem primeru doseže, je prav lahko nižja od zahtevane.

To povzroči manjšo vzdržljivost izdelanega kosa v uporabi. Cementacijska globina in neugoden potek trdote sta v zvezi z difuzijo želene vsebnosti ogljika v kritično plast s trdoto 50 Rc. Da ugotovimo zahtevano vsebnost ogljika, je potrebno poznati dejansko ohlajevalno hitrost v kritični globini. To se lahko določi na dva načina:

- z elektronskim registratorjem določamo ohlajevalne hitrosti v različnih globinah,
- dejansko ohlajevalno hitrost v globini določimo po primerjalni metodi s pomočjo jominy poizkusa in ustreznih monogramov.

Privzamemo, da je bila ohlajevalna hitrost na 1 mm pod površino zoba zobatega kolesa določena in je ekvivalentna oddaljenosti od kaljenega čela 8,8 mm. Katera vsebnost ogljika je potrebna za dosego 50 Rc na tem mestu pod površino, če je zobato kolo izdelano iz jekla AISI 4028 in je izra-

čunani idealni kritični premer  $D_t = 1,42''$  (36 mm)? Če se poslužimo diagrama izotrdot (sl. 13), določimo presečišče izotrdotne krivulje za 50 Rc z oddaljenostjo od kaljenega čela 8,8 mm (0,350") pri 0,52 % C. Ta postopek nam daje potrebno informacijo za kontrolo in izbiro učinkovite cementacijske globine v zvezi s predhodno definicijo. Trdota in cementirana globina na korenu zoba zobatega kolesa je prav tako izredne važnosti zaradi čestih defektov zaradi utrujanja.

Opisani postopek uporabe izotrdotnih diagramov je podoben tudi v sledečem primeru.

V normalni proizvodnji cementiranega in kaljenega kosa je običajno predpisana vrsta jekla. Izbira se izvrši na osnovi kaljivosti ali kemijske sestave. Zato se za proizvodno kontrolo uporabi tri diagrame izotrdot in to za taline na zgornji, srednji in spodnji meji kemijske sestave ali kaljivosti.

Kritični premeri se lahko računajo za posamezne šarže jekla iz njihove kemijske sestave. Na osnovi te informacije se izbere diagram, ki je po pripadajočem kritičnem premeru najbližji. Z interpolacijo lahko določimo tisto vsebnost ogljika, ki je potrebna za doseg želene trdote ob pred-

hodno določeni ekvivalentni ohlajevalni hitrosti. Ta postopek je Gurley<sup>8</sup> uporabil pri termični obdelavi petdesetih šarž jekla v redni proizvodnji. Preko 95 % šarž je ustrezalo termični obdelavi, ki je bila teoretično predpisana. Diagrame izotrdot lahko primerjamo z izotermnimi premenskimi diagrami. Izotermni premenski diagrami so konstruirani tako, da dajejo čas začetka in konca premene avstenita pri konstantnih temperaturah. Diagrami izotrdot pa so konstruirani tako, da kažejo pogoje, ki so potrebni za doseg konstantnih trdot. Seveda ne definirajo samo pogojev za eno samo konstantno trdoto, ampak za katerokoli trdoto.

### PREIZKUŠANJE OBROBNE KALJIVOSTI DOMAČIH CEMENTACIJSKIH JEKEL

V železarni Ravne smo preizkusili obrobno kaljivost treh vrst jekel za cementacijo EC 80 (Č.4320), ECMo 80 (Č.4720) in 20 MoCr4 (Č.7420). Za prvi dve vrsti smo preizkusili po tri šarže, za zadnjo pa le dve. Vse poizkuse smo izvedli s tremi paralelkami. Šarže smo vzeli iz redne proizvodnje brez posebnega izbiranja kemijske sestave.

Izbrali smo naslednje šarže:

šarža	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %		Velikost zrna po Mc Quaid Ehnu
<b>EC 80</b>									
Č.4320	6649	0,17	0,27	1,15	0,016	0,023	0,93		6
Č.4320	15194	0,15	0,40	1,23	0,020	0,030	1,30		5—6
Č.4320	6711	0,17	0,32	1,10	0,019	0,033	1,05		6
<b>ECMo 80</b>									
Č.4720	6222	0,13	0,36	0,86	0,015	0,022	1,09	0,24	6
Č.4720	6664	0,15	0,28	0,97	0,018	0,020	1,10	0,23	5
Č.4720	6650	0,17	0,20	0,85	0,022	0,023	1,14	0,26	5—6
<b>20 MoCr4</b>									
Č.7420	10595	0,21	0,27	0,65	0,013	0,024	0,44	0,42	6
Č.7420	11384	0,18	0,24	0,63	0,012	0,029	0,48	0,59	6

#### Priprava prob

Od vsake šarže smo skovali palice  $\varnothing$  32 mm. Palice smo normalizirali z držanjem 30 minut na temperaturi 925° C in jih ohladili na mirnem zraku.

Iz palic vsake šarže smo izdelali šest standardnih jominy prob — tri za kaljivost jedra in tri za obrobno kaljivost — ter tri palice  $\varnothing$  25×150 milimetrov za določevanje ogljikovega gradienta.

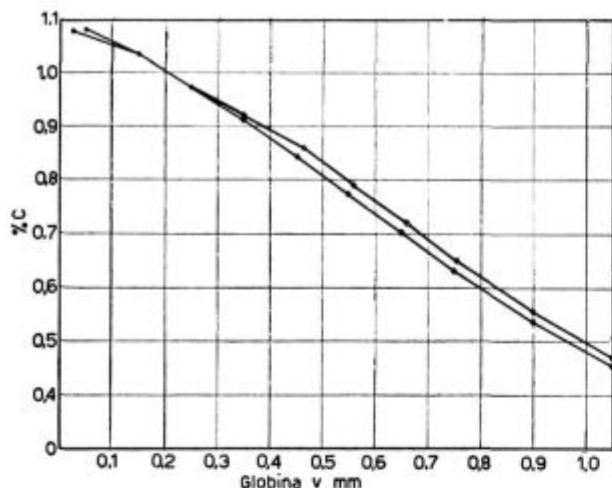
#### Cementacija

Probe za določevanje ogljikovega gradienta ter jominy probe za določevanje obrobne kaljivosti smo cementirali v zaboječkih. Istočasno sta se v

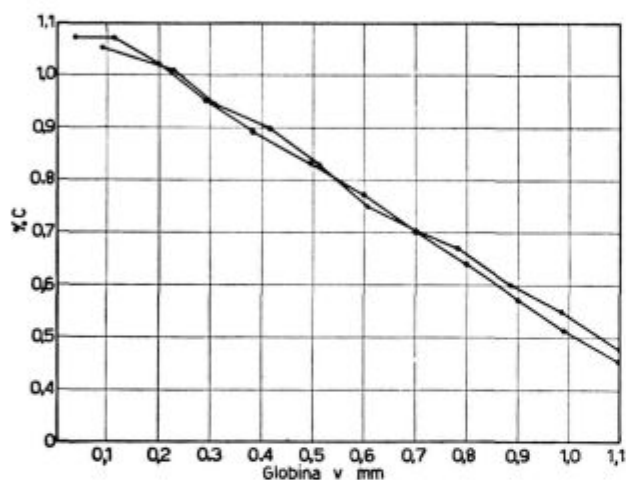
cnem zaboju cementirali po dve probi, ena za jominy poizkus in druga za določevanje vsebnosti ogljika. Vse probe smo cementirali 9 ur na temperaturi 925° C v trdnem cementacijskem sredstvu durferrit granulat 30. Vse probe smo ohlajali v cementacijskem sredstvu, tako da smo zaboječke ohlajali prosto na zraku. Po ohladitvi smo probe za določevanje ogljikovega gradienta stružili po plasteh.

#### Kaljenje

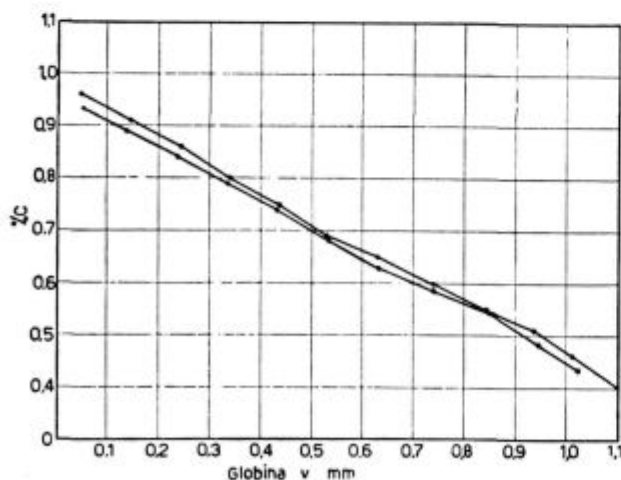
Jominy probe smo segreli v lončku z grafitno podlogo na temperaturo 820° C in jih po 30-minutnem držanju na temperaturi 10 minut čelno kalili po predpisih za standardni jominy poizkus.



Slika 26  
Krivulja naogljichenja EC 80



Slika 27  
Krivulja naogljichenja ECMo 80



Slika 28  
Krivulja naogljichenja 20 Mo Cr 4

### Določevanje ogljikovega gradienta

Probo za določevanje ogljikovega gradienta smo stružili v stopnjah po 0,1 mm. Ostružkom vsake stopnje smo nato posebej analizirali ogljik. Iz določitve odstotka ogljika v vsaki stopnji smo potem lahko narisali krivulje naogljichenja. Podajamo za vsako vrsto po en diagram (Glej slike 26—28!)

V vsakem od teh diagramov sta vrisani krivulji naogljichenja za dve šarži. Žal nismo naredili teh krivulj za večje število šarž, da bi dobili celotno odstopanje ogljikovega gradienta glede na legirne elemente, če ti nihajo od maksimalnih do minimalnih predpisanih analiznih mej. Pri enakih pogojih cementacije imajo legirni elementi odločilen vpliv na difuzijo ogljika oziroma na sposobnost naogljichenja.

### Merjenje trdote

Iz krivulj naogljichenja smo določili globine, kjer je vsebnost ogljika 1,0—0,9—0,8—0,7 in 0,6%.

Cementirano in čelno kaljeno jominy probo smo zbrusili do ustreznih globin in nato izmerili trdote vzdolž jominy prob po Vickersu z 10 kg obtežbo. Za vsak odstotek ogljika je bila zbrusena posebna ploskev, tako da v nobenem položaju ni bila merjena trdota dvakrat za različna odstotka ogljika.

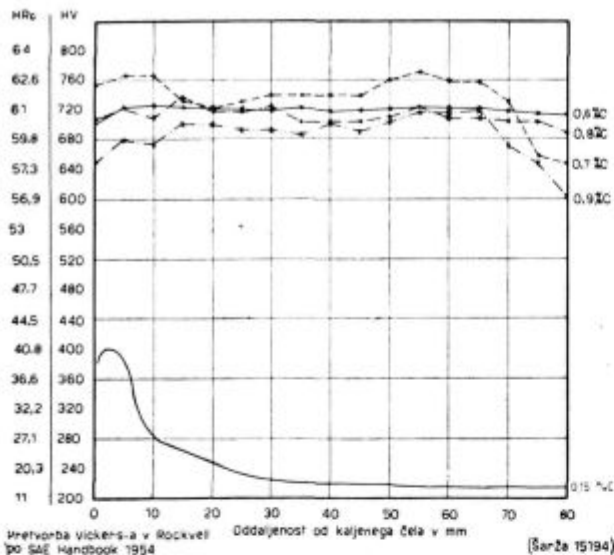
Trdota vicerksa (HV) smo preračunali v trdoto po Rockwellu (HRC), ker se obrobna kaljivost običajno podaja s trdoto po Rockwellu. Za preračunavanje trdote vickersa v trdoto rockwella smo uporabili tabelo v S. A. E. Hand book 1954.

### Podajanje rezultatov

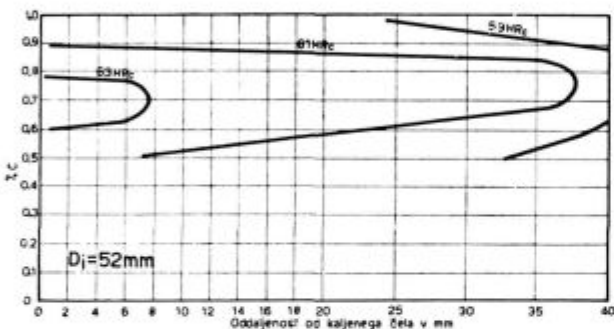
Rezultate podajamo v obliki jominy krivulj (za primer glej sl. 29, 31, 33) in z izotrdotnimi diagrami (za primer glej sl. 30, 32, 34). Izotrdotni diagrami niso popolni, ker smo pri planiranju poizkusov predvidevali podajanje rezultatov z jominy krivuljami, nato pa smo poizkusili prikazati obrobno kaljivost še z izotrdotnimi diagrami. Izotrdotni diagrami vključujejo vse nivoje ogljika od ogljika v osnovnem jeklu ~ 0,2% do najvišjega odstotka ogljika v cementirani skorji. V levem spodnjem delu je podan idealni kritični premer za osnovno jeklo.

### Č.4320 — EC 80

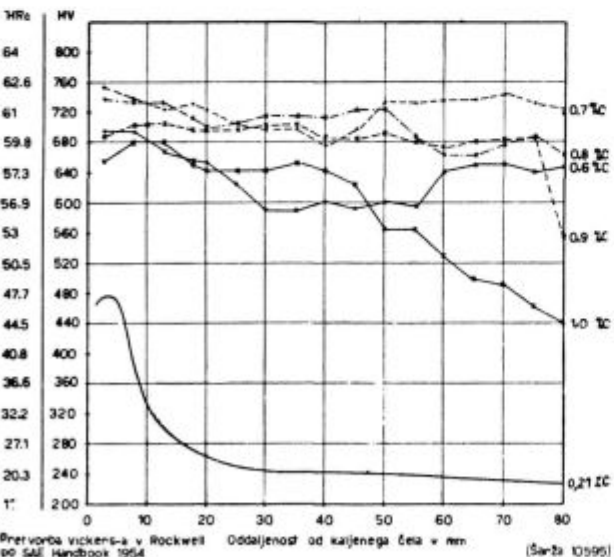
Jominy krivulja osnovnega jekla kaže začetno trdoto okrog 40 HRC (Slika 29). Pri oddaljenosti nad 5 mm od kaljenega čela trdota hitro pada in doseže že pri 10 mm okrog 27 HRC, pri 20 mm pa le še 20 HRC. Cementirana plast doseže najvišjo trdoto pri 0,7% ogljika. V izotrdotnem diagra-



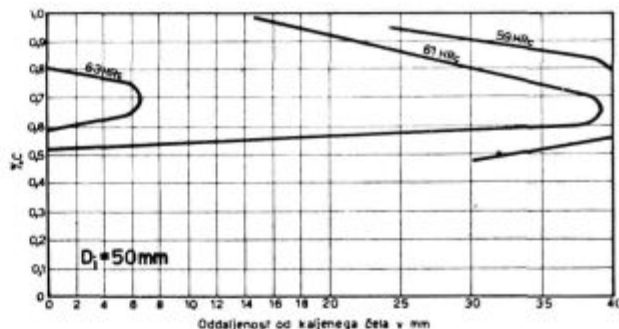
Slika 29  
Obrobna kaljivost EC 80



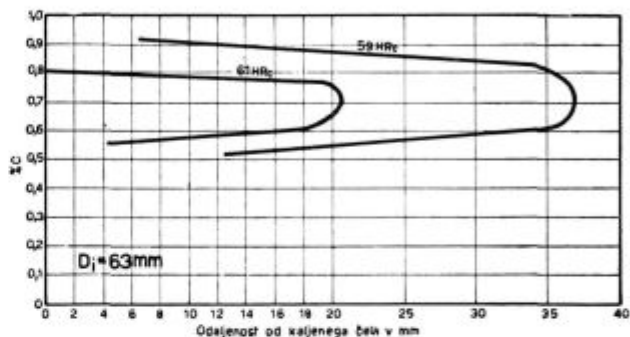
Slika 30  
Izotrdotni diagram EC-80  
poprečje treh šarž



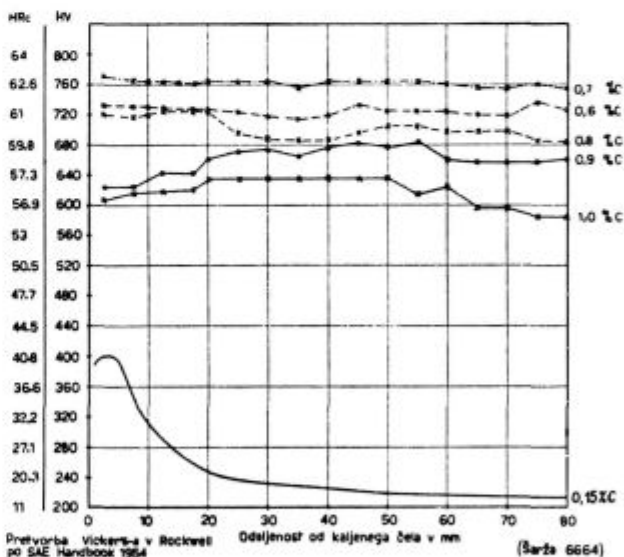
Slika 31  
Obrobna kaljivost ECMo 80



Slika 32  
Izotrdotni diagram ECMo 80  
poprečje treh šarž



Slika 33  
Obrobna kaljivost 20 Mo Cr 4



Slika 34  
Izotrdotni diagram 20 Mo Cr 4  
poprečje dveh šarž

mu so krivulje zelo položne. Optimum trdote v odvisnosti od ohlajevalne hitrosti doseže to jeklo v območju 0,7—0,8 % vsebnosti ogljika v cementirani plasti. Oblika krivulj v izotrdotnem diagramu kaže za to jeklo zadovoljivo kaljivost.



Jominy krivulja osnovnega jekla na sliki 31 kaže enako začetno trdoto in nekoliko boljšo kaljivost v primerjavi z jeklom Č.4320. Prevojna točka jominy krivulje je pri oddaljenosti okrog 8 mm od kaljenega čela. Pri oddaljenosti 10 mm je povprečna trdota za 4—5 HRc višja od jekla Č. 4320.

Trdota in kaljivost cementirane plasti se povečuje z zviševanjem vsebnosti ogljika do 0,7 odstotkov, nato pa z naraščanjem ogljika hitro pada. Pri 1% ogljika doseže cementirana plast le okrog 57 HRc. Zaradi te ugotovitve se ne priporoča cementacija, pri kateri bi vsebnost ogljika preseгла 0,75 odstotka.

#### Č.7420 — 20 Mo Cr 4

Začetna trdota, ki jo kaže jominy krivulja osnovnega jekla na sliki 33 je v primerjavi s slikama 29 in 31 znatno višja. Pri tem moramo upoštevati razliko v vsebnosti ogljika teh treh šarž. Tudi kaljivost tega jekla je nekoliko boljša, kar je v skladu z vsebnostjo legiranih elementov. Najvišjo trdoto doseže cementirana plast tega jekla pri vsebnosti 0,7—0,8 odstotkov ogljika. Pri višjih vsebnostih ogljika trdota pada. Izotrdotne krivulje so izredno položne. To je ugodno za jeklo, ki je namenjeno za direktno kaljenje. Enaka vsebnost ogljika daje preko obsežnega območja ohlajevalnih hitrosti enakomerno trdoto.

#### Zaključki o izvršenih poizkusih

Vse tri vrste preizkušanih jekel imajo dobre kalilne lastnosti skorje in jedra.

Najvišje trdote cementirane plasti so razmeroma nizke. Te vrednosti v HRc je treba upoštevati bolj za medsebojne primerjave kakor pa absolutno, ker so preračunane iz meritev po Vickersu z majhno obtežbo.

Pri brušenju merilnih ploskev je treba posvečati posebno pozornost dobremu hlajenju, da ne pride do popuščanja.

Rezultati teh poizkusov se dobro ujemajo z rezultati preizkušanja obrobne kaljivosti naših jekel na Metalurškem inštitutu v Ljubljani.

Posebej je treba poudariti, da je bil glavni pomen izvršenih praktičnih poizkusov osvajanje metodike preizkušanja in vrednotenja obrobne kaljivosti, ne pa ugotavljanje povprečnih lastnosti posameznih vrst jekel, za kar bi bilo potrebno večje število šarž.

Metodiko preizkušanja obrobne kaljivosti v tekoči kontroli bi bilo potrebno posebej prilagoditi v obliki kontrole enakomernosti že poznanih osnovnih lastnosti, ker je kompletno preizkušanje

obrobne kaljivosti za šaržo preobsežno in časovno neizvedljivo. Za tako kontrolo je primernejše brušenje vedno enakih globin cementirane plasti, ker se ogljik lahko za te globine analizira naknadno. Tako je tudi omogočena kontrola enakomernosti naogljjevanja.

Pri preizkusih je treba jemati vedno sveže cementacijsko sredstvo enake sestave.

#### ZAKLJUČKI O METODI PREIZKUSANJA OBROBNE KALJIVOSTI

Grafična metoda jasno vrednoti in prikazuje v praktično uporabni obliki kaljivost cementirane jekla ter kaže ločeno in kombinirano vpliv ohlajevalne hitrosti, vsebnosti ogljika in kaljivosti na doseženo trdoto.

Iz diagramov izotrdot se lahko neposredno odčita tisto vsebnost ogljika na površini, ki daje najvišjo trdoto pri posameznih vrstah jekla in pri različnih ohlajevalnih hitrostih. Iz teh diagramov, ki so za posamezne vrste jekel značilni, je razviden vpliv kemijske sestave jekla na lastnosti cementirane plasti.

Diagrami izotrdot dajejo osnovo za pregledno primerjavo vplivov indirektnega in direktnega kaljenja po cementaciji na dosežene lastnosti za razne vrste jekel.

S pomočjo diagramov lahko ugotovimo, kako debela mora biti cementirana plast, da se doseže minimalna cementacijska globina (s kriterijem trdote 50 HRc) pri dani toplotni obdelavi in vrsti jekla.

Ti diagrami ponazarjajo tudi odvisnost obrobne kaljivosti jekla od kaljivosti osnovnega jekla.

V zadnjih letih se metodika preizkušanja obrobne kaljivosti ter prikazovanja in uporabe rezultatov še naprej usklaja in razvija.

#### Literatura

- 1 Harris, »Case Depth«, Metal Progress, Vol. 44 (avg. 1943), str. 265—272
- 2 Stanley, »Steel Carburization and Decarburization, a Theoretical Analysis«, The Iron Age (feb. 4, 1943), 49—55
- 3 Guy, »Predicting Carbon Penetration Curves in Carburizing«, The Iron Age, Vol. 163 (Jan. 27, 1949), str. 74—76
- 4 Jominy, Boegehold, »Hardenability Test for Carburizing Steel«, Transactions of American Society for Metals, Vol. 26 (1938), 574—606
- 5 Kayser, Thomson, Boegehold, »End Quench Test for Determining the Hardenability of Carburized Steels«, Trans. A. S. M., Vol. 45 (1953), 1056—1070

- <sup>6</sup> Meyer, »Der Einfluss von Legierungsstoffen auf die Randhärbarkeit von Einsatzstählen«, Stahl und Eisen, 76., (1956), Heft 2, str. 68—78
- <sup>7</sup> Meyer, »Die Randhärbarkeit als Kriterium der Einsatzstähle«, Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, Jg. 105, H11, 1960, str. 292—301
- <sup>8</sup> Gurley, Hannewald, »Development and Application of Isohardness Diagram«, Metal Treating Vol. 7, No. 3 (Maj — Junij, 1956), 2—6, 32, 33
- <sup>9</sup> Ruffle, »Gas Carburizing and Case Hardenability, Some Basic Data«, Metal Treatment and Drop Forging, Vol. 25, No. 158 (Nov. 1958), str. 475—481
- <sup>10</sup> Halgren, Solecki, »Case Hardenability of SAE 4028, 8620, 4620 and 4815 Steels«, SAE Transactions 1961, str. 662—676
- <sup>11</sup> Grossmann, »Hardenability Calculated from Chemical Composition«, Transactions, AIME Vol. 150 (1942), str. 22
- <sup>12</sup> Kramer, Hafner, Toleman, »Effect of Sixteen Alloying Elements on Hardenability of Steel«, Transactions AIME, Vol. 158 (1944), str. 138
- <sup>13</sup> Hodge, Orehoski, »Relationship Between Hardenability and Percentage of Martensite in Some Low Alloy Steels«, Transactions, AIME, Vol. 167 (1946), str. 627—638

Odgovorni urednik: Joža Arh, dipl. inž. — Člani: Jože Rodič, dipl. inž., Janez Barborič, dipl. inž., Aleksander Kveder, dipl. inž., Edo Žagar, tehnični urednik.

Tisk: ČP »Gorenjski tisk«, Kranj