

## 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

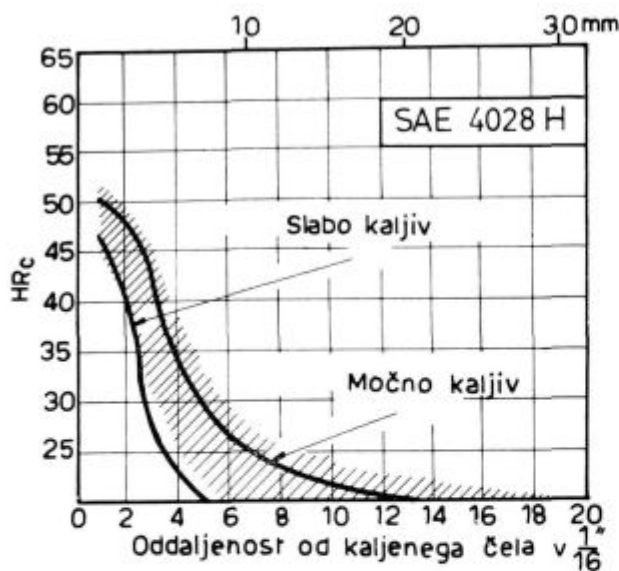
Diagrami na slikah 1—4 prikazujejo kaljivost jedra navedenih ameriških jekel za cementacijo v primerjavi s pasovi garantirane kaljivosti.

### Priprava vzorcev

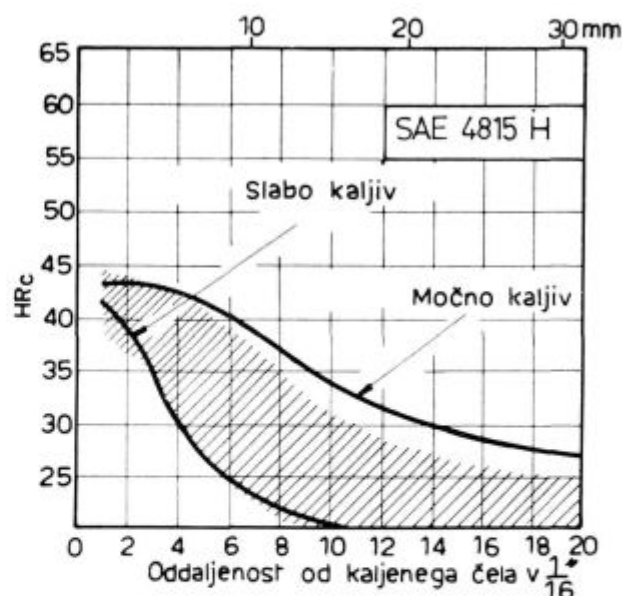
Iz vsake gredice izbranega jekla so skovali po dve palici Ø 32 mm dolžine ca. 1800 mm. Kovane palice so normalizirali. Pri tem so vsa preizkušana jekla enako držali po 1 uro na temperaturi normalizacije 927° C.

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

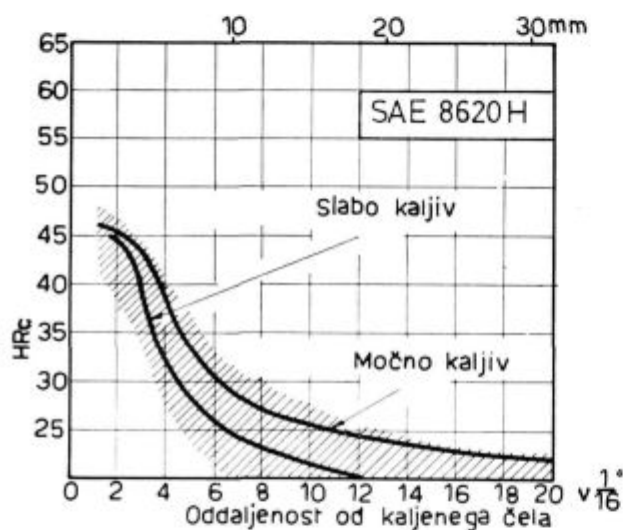
V istem zabožku so vedno istočasno cementirali po dve jominy probi z brušenima ploskvama ter dve probi za določevanje nivojev ogljika. Za cementacijo so uporabljali trdno cementacijsko sredstvo. Čelnih ploskev jominy prob niso zaščitili pred cementacijo. Probe so vložili v cementacijsko sredstvo, tako 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 %

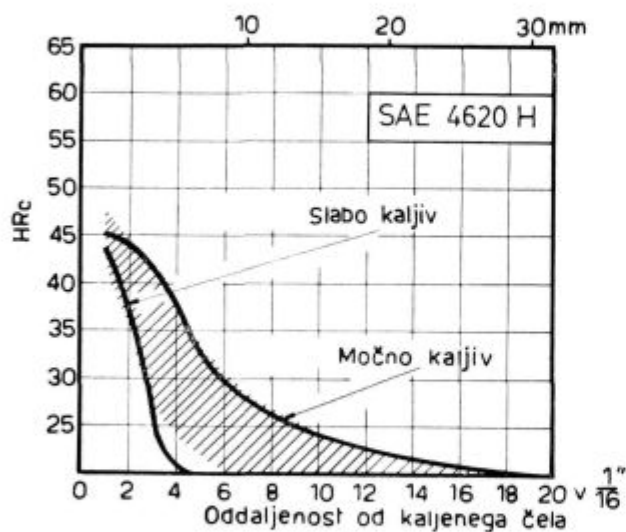
Dobro zamazane zabožčke so vložili v peč na temperaturi 427° C ter jih s pečjo ogrevali na temperaturi 927° C. Na tej temperaturi so jih cementirali 18 ur.

##### 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

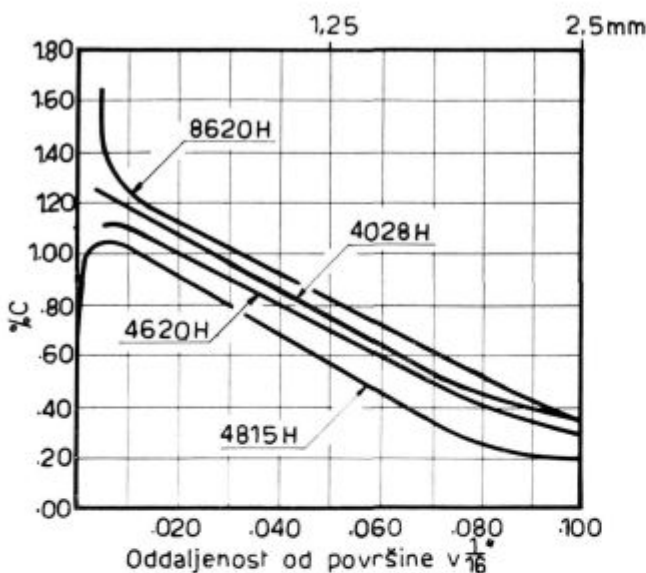
Površinske okside so odstranili s tem, da so palice obrzgalili s paro. Po odstranitvi oksidov so palice stružili:

- 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.

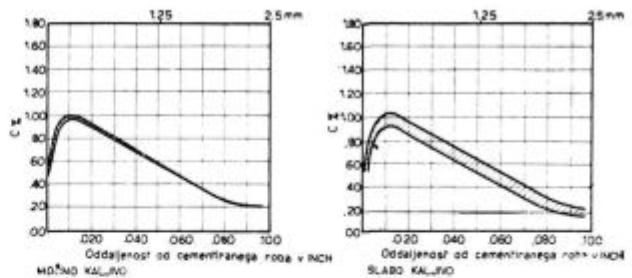
Poprečni ogljikovi gradienti za šarže z visoko kaljivostjo vseh preizkušanih jekel so podani v sliki 5 (podatki pripadajo jominy probam, ki so bile direktno kaljene).



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

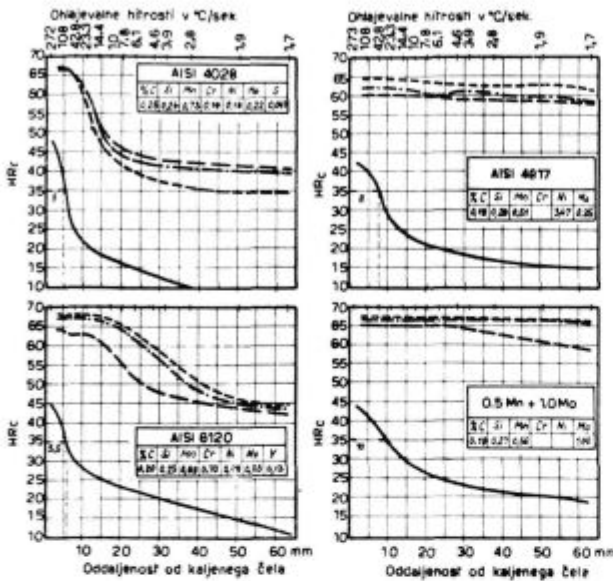
Do nedavna so kot najbolj uporabno in najprimernejšo obliko prikazovanja obrobne kaljivosti smatrali diagrame z jominy krivuljami za posamezne nivoje ogljika. Način prikazovanja obrobne kaljivosti s pomočjo jominy krivulj za različno kaljiva jekla prikazujejo diagrami na sliki 8.

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

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.

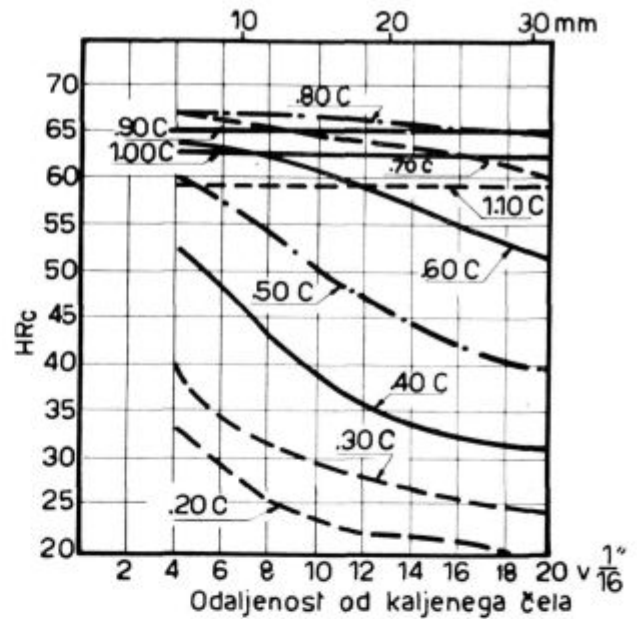
Sliki 9 in 10 kažeta rezultate obrobne kaljivosti v obliki Jominy krivulj. Pri tem sta dve možnosti.

»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.

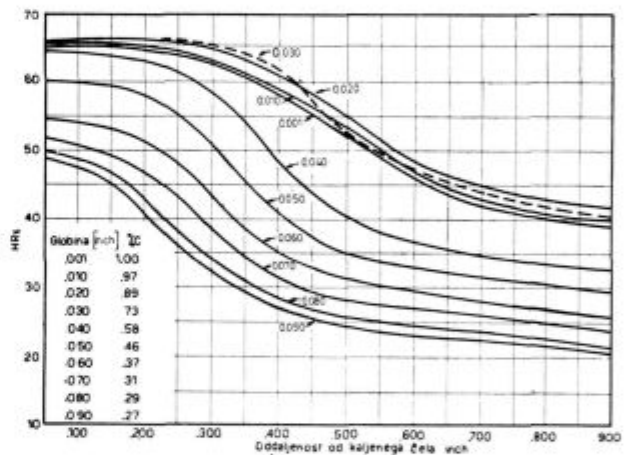
Druga možnost je, da jominy probe zbrusimo na enakomerne globine in nato določimo tem globinam ustrezne vsebnosti ogljika. Tako dobimo obliko diagrama na sliki 10, kjer so ob posameznih krivuljah označene ustrezne globine cementirane plasti.

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 paralel grafčno 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,

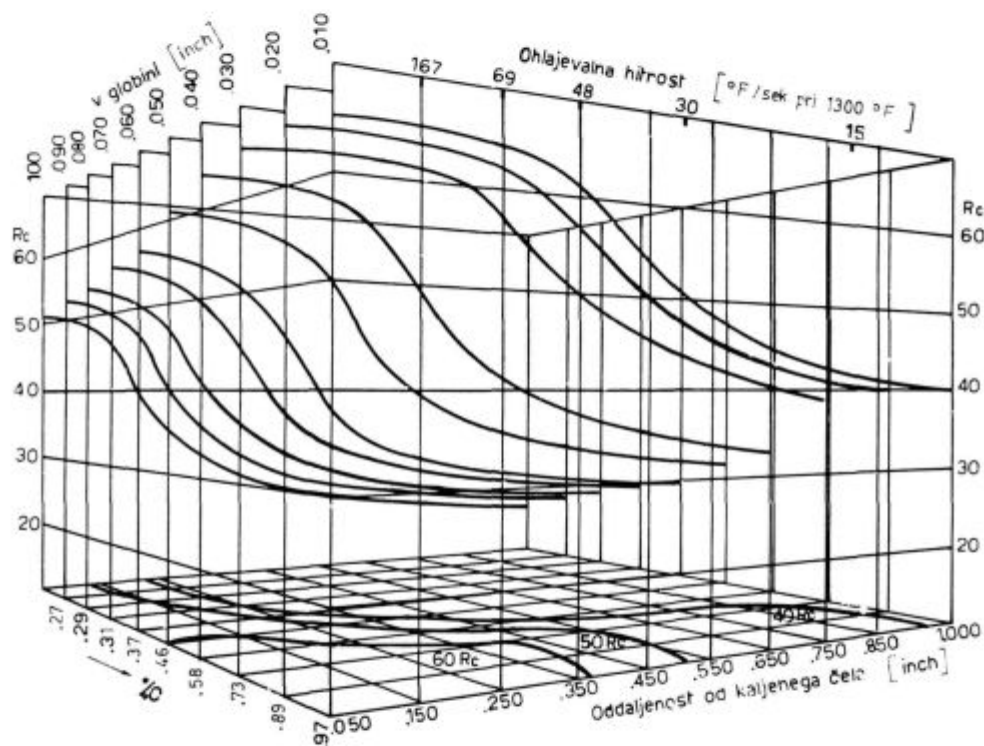
— konstantne vsebnosti ogljika na določeni globini cementirane plasti.

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.

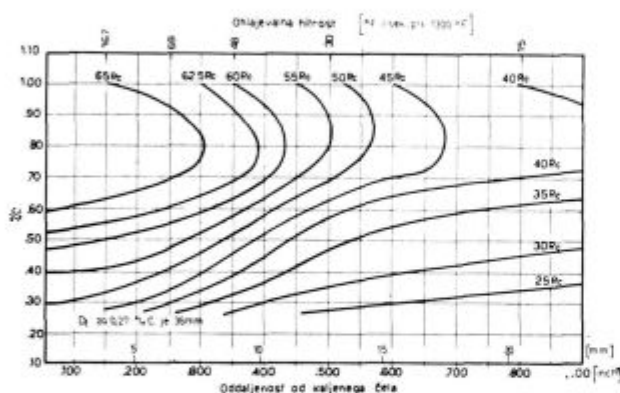
HRC	Oddaljenost od kaljenega čela v $\frac{1}{16}$ "																			globina inche	
	05	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95		100
100	65	65	65	64	63	62	60	57	55	52	49	45	43	42	41	40	39	38	38	38	.001
97	65	65	65	64	63	62	59	57	53	49	47	47	42	41	41	40	39	38	38	38	.010
95	66	66	66	65	64	63	61	59	55	52	48	46	44	43	43	42	41	40	39	38	.020
73	66	66	66	65	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	42	41	40	39	38	37	36	35	34	.040
46	60	60	59	58	56	51	45	41	37	35	34	33	32	32	31	31	30	29	28	28	.050
37	55	54	53	52	48	44	38	35	33	31	30	29	28	27	26	26	25	25	24	24	.060
31	52	51	49	47	44	39	34	31	29	28	27	27	26	25	25	24	24	23	23	23	.070
29	50	49	47	45	41	36	31	29	27	26	25	24	24	23	23	22	22	21	21	21	.080
27	49	47	46	44	38	33	29	27	25	24	24	23	22	22	21	21	21	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 cementacijskega jekla.



Slika 13

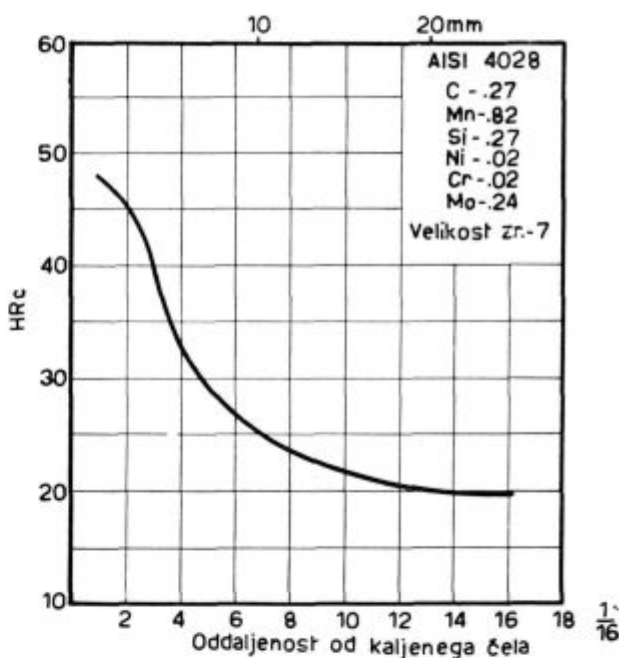
Primer diagrama kaljivosti cementiranega jekla AISI 4028 v obliki izotrdot (A. E. Gurley, C. R. Hannewald)

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.

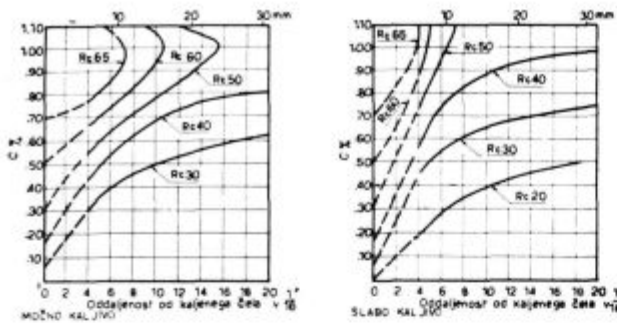
— Druga metoda: pri tej metodi se poslužujejo neposrednega vnašanja rezultatov preizkusa kaljivosti osnovnega jekla v diagram.

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.



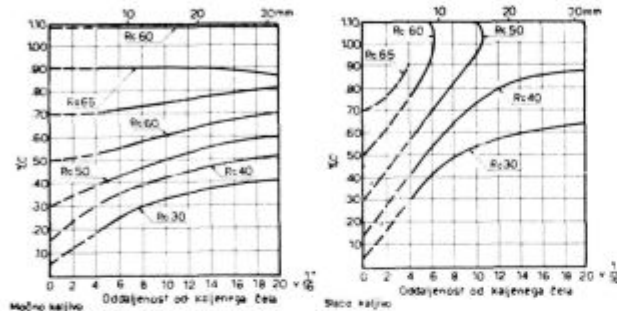
Slika 14  
Kaljivost jedra

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.



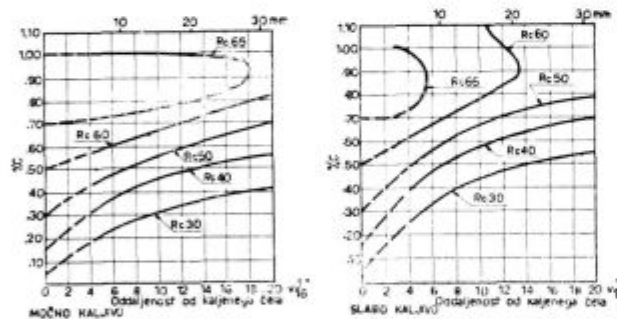
Slika 15

Izotrdotni diagram cementiranega in direktno kaljenega jekla SAE 4028 H



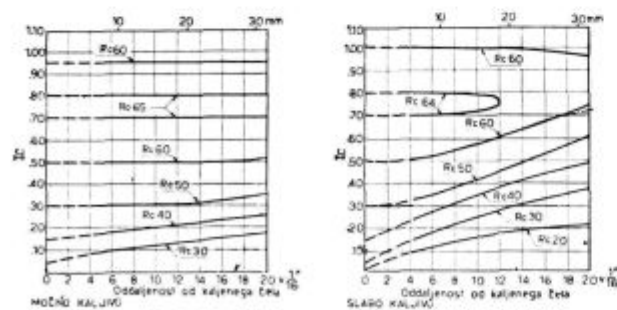
Slika 16

Izotrdotni diagram cementiranega in direktno kaljenega jekla SAE 8520 H



Slika 17

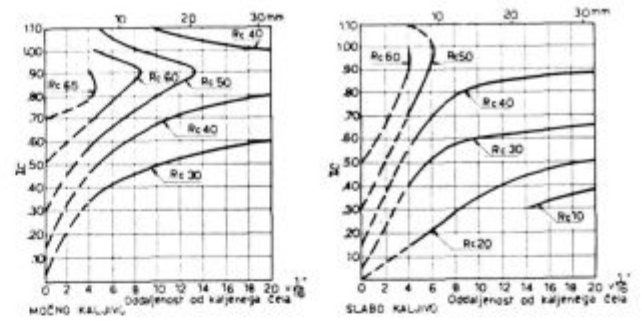
Izotrdotni diagram cementiranega in direktno kaljenega jekla SAE 4620 H



Slika 18

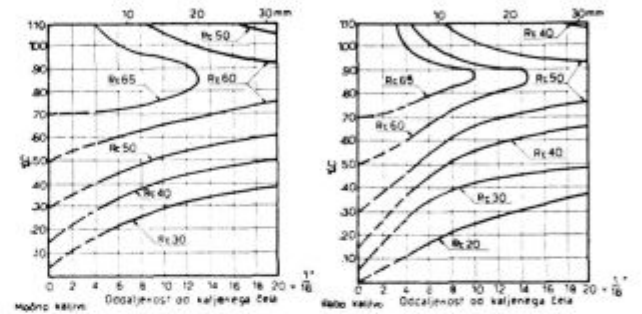
Izotrdotni diagram cementiranega in direktno kaljenega jekla SAE 4815 H

Slike 19—22 kažejo analogne diagrame izotrdot za indirektno kaljene probe.



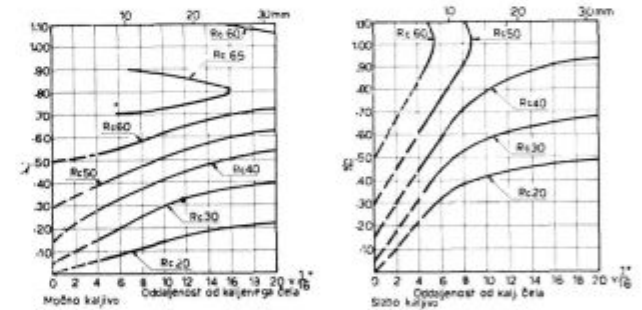
Slika 19

Izotrdotni diagram cementiranega, ponovno ogretega in kaljenega jekla SAE 4028 H



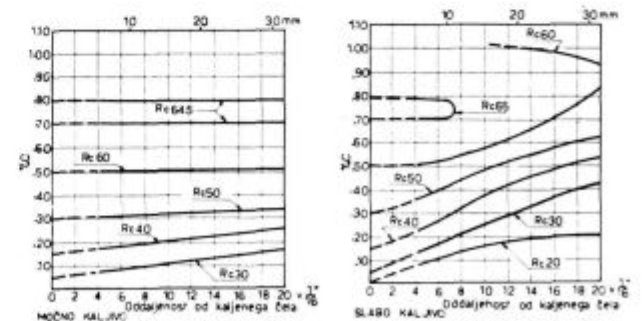
Slika 20

Izotrdotni diagram cementiranega, ponovno ogretega in kaljenega jekla SAE 8620 H



Slika 21

Izotrdotni diagram cementiranega, ponovno ogretega in kaljenega jekla SAE 4620 H

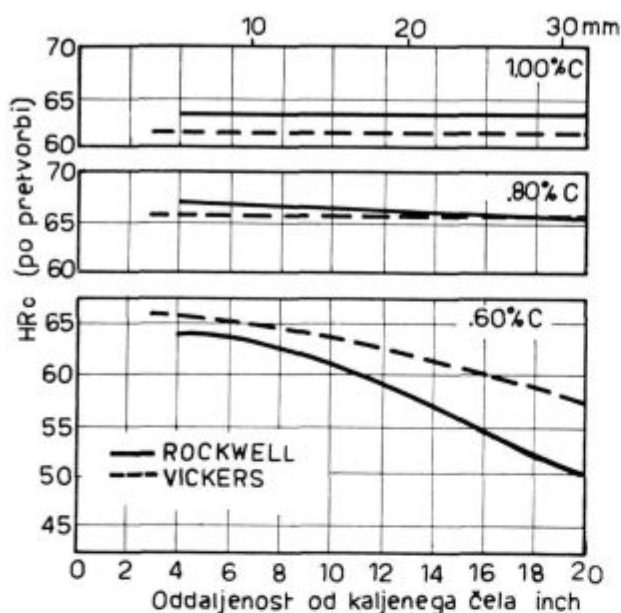


Slika 22

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

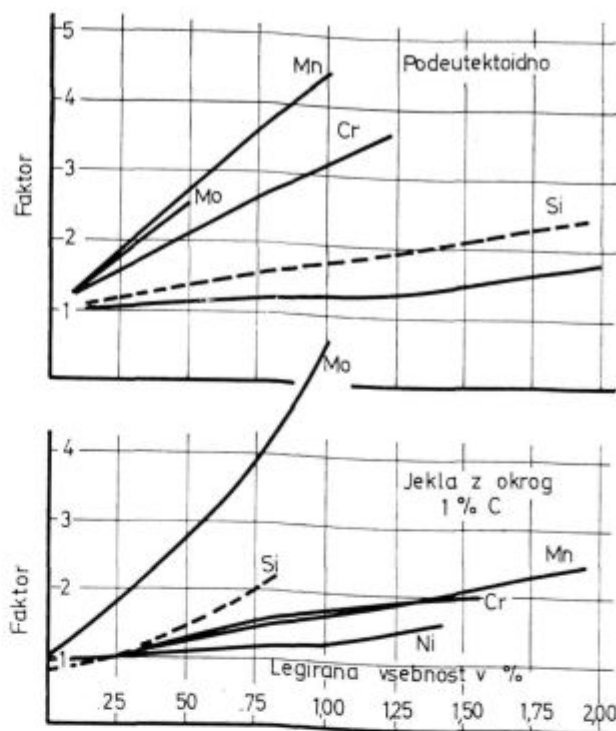
Kontrola kemijske sestave vseh osmih šarž preizkušenih jekel je pokazala, da vse šarže ustrezajo predpisanim območjem kemijskih vsebnosti, legirnih elementov in da so šarže z nizko kaljivostjo v spodnji tretjini območja ter šarže z visoko kaljivostjo v zgornji tretjini predpisanega kemijskega območja. 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)

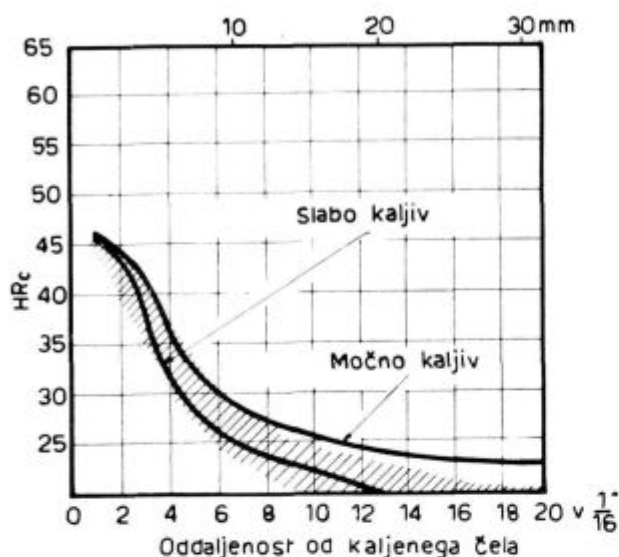
Na tak način bi mogli ugotoviti približni vpliv legirnih elementov na kaljivost jedra le pri seriji jekel v ločenih območjih ogljika. V obravnavanih raziskavah so imeli na razpolago tako serijo šarž pri jeklu SAE 8620 H. Ta aproksimacija potem ustreza trosenju kaljivosti jedra, ki je ugotovljena pri 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

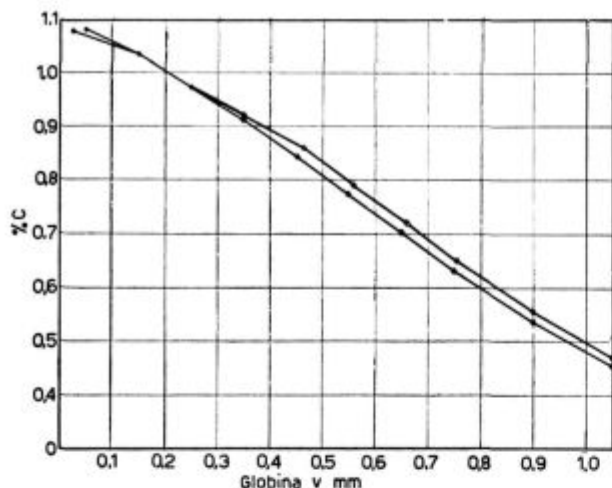
Probe za določevanje ogljikovega gradienta ter jominy probe za določevanje obrobne kaljivosti smo cementirali v zaboječkih. Istočasno sta se v

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.

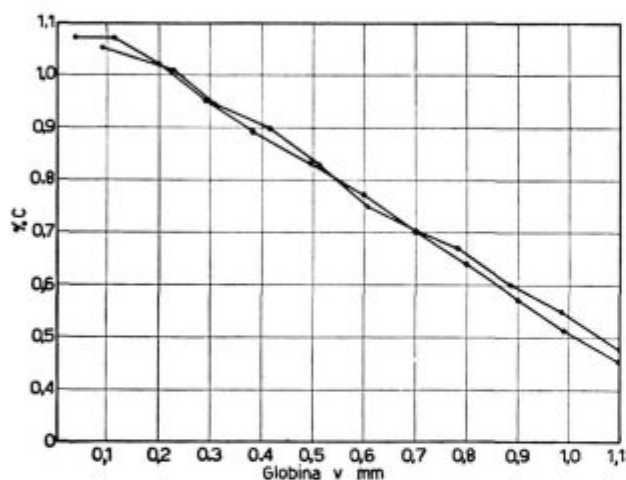
#### Kaljenje

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.

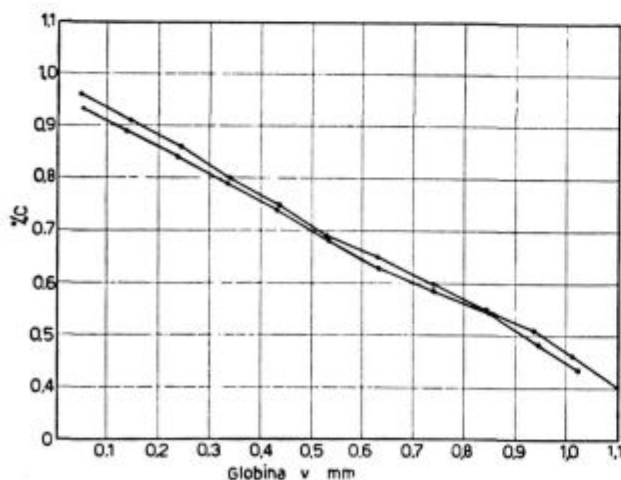




Slika 26  
Krivulja naogljichenja EC 80



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.

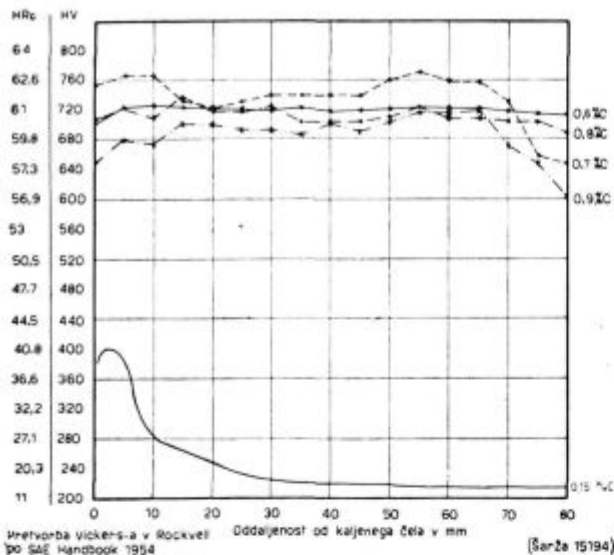
Trdota vicerksa (HV) smo preračunali v trdoto po Rockwellu (HRC), ker se obrobna kaljivost običajno podaja s trdoto po Rockwellu. Za preračunavanje trdote vickersa v trdoto rockwella smo uporabili tabelo v S. A. E. Hand book 1954.

### Podajanje rezultatov

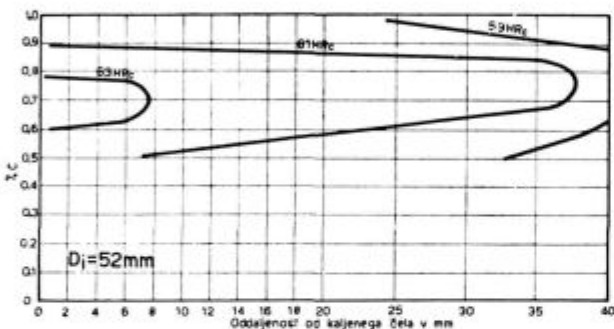
Rezultate podajamo v obliki jominy krivulj (za primer glej sl. 29, 31, 33) in z izotrdotnimi diagrami (za primer glej sl. 30, 32, 34). Izotrdotni diagrami niso popolni, ker smo pri planiranju poizkusov predvidevali podajanje rezultatov z jominy krivuljami, nato pa smo poizkusili prikazati obrobno kaljivost 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

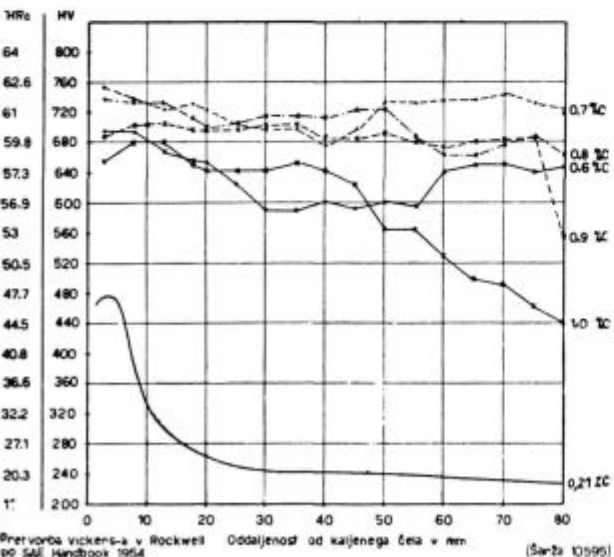
Jominy krivulja osnovnega jekla kaže začetno trdoto okrog 40 HRC (Slika 29). Pri oddaljenosti nad 5 mm od kaljenega čela trdota hitro pada in doseže že pri 10 mm okrog 27 HRC, pri 20 mm pa le še 20 HRC. Cementirana plast doseže najvišjo trdoto pri 0,7% ogljika. V izotrdotnem diagramu



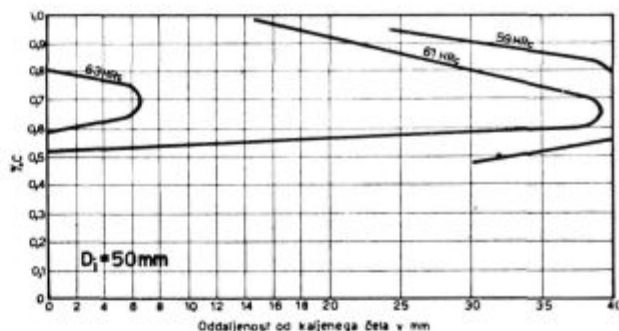
Slika 29  
Obrobna kaljivost EC 80



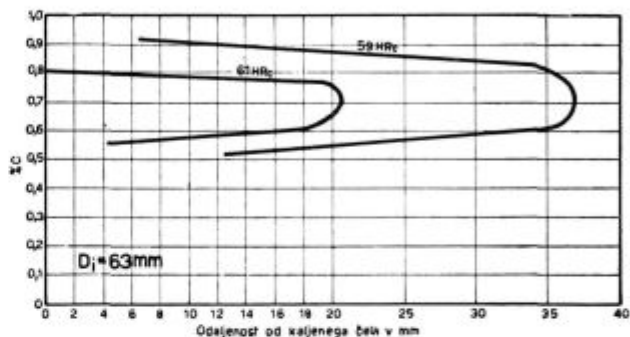
Slika 30  
Izotrdotni diagram EC-80  
poprečje treh šarž



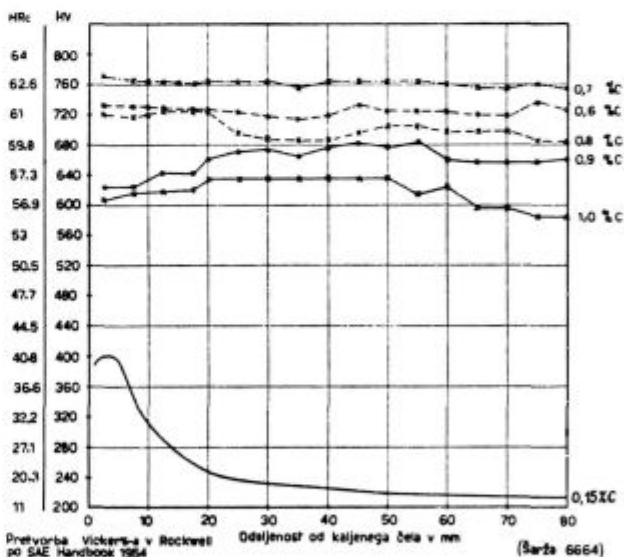
Slika 31  
Obrobna kaljivost ECMo 80



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