

Jože Rodič, dipl. inž., Alenka Rodič, dipl. inž.,
Ivica Hrastnik, Železarna Ravne

DK:543.7 : 669.71
AMS/SLA: J 5 d, J 28 g—1.54, AYb, CNg

Prispevek k tipizaciji pogojev preizkušanja obrobne kaljivosti cementiranih jekel

Članek predstavlja povzetek vseh dosedanjih raziskav obrobne kaljivosti v železarni Ravne, upoštevajoč tudi naloge, ki jih je na tem področju opravil po naročilu železarne Ravne Metalurški inštitut v Ljubljani.

Članek na osnovi dosedanjih ugotovitev podaja predlog tipizacije pogojev preizkušanja obrobne kaljivosti, kar bi omogočalo medsebojne primerjave in s tem dalo poizkusu reproduktivno vrednost ter širšo uporabnost.

Podane so variante preizkušanja za raziskovalne in kontrolne preiskave za direktno in indirektno kaljenje.

Z jominyjevimi krivuljami in z nomogrami izotrdot so prikazane karakteristične lastnosti tipičnih vrst jekel za cementacijo iz proizvodnega programa železarne Ravne.

Uvod

Razvoj tehnike, ki je izredno hiter prav na področju motorne industrije, je zaradi velikoserijske in avtomatizirane proizvodnje izzval poostrene zahteve zagotavljanja ustreznih in enakomernih lastnosti jekla. Ena najvažnejših tehnoloških lastnosti v proizvodnji konstrukcijskih delov je kaljivost jekla.

Pri jeklih za poboljšanje standardni jominyjev poizkus dokaj dobro karakterizira to lastnost jekla, medtem ko je pri cementiranih jeklih kljub poznanju kaljivosti jedra večji del problemov vezanih s kaljivostjo cementiranih delov ostal precej časa nerešen.

Potrebe po novi metodiki preizkušanja cementiranih jekel je še pospešilo uvajanje plinske cementacije in direktnega kaljenja. Plinska cementacija je prinesla polno novosti v tehnologijo in ekonomiko cementacije, obenem pa je ta tehnološki

postopek postavil tudi nove zahteve glede značilnih lastnosti jekel.

Precej dolgo je prevladovalo mnenje, da je kaljivost osnovnega jekla za cementacijo (t.j. jedra) sama zadosten kriterij za izbiro jekla in da je s kaljivostjo jedra dovolj definirana tudi kaljivost cementirane plasti. To mnenje danes nima več nobene vrednosti, saj je praktično in teoretično dokazano, da enako povečanje vsebnosti ogljika nikakor nima enakega vpliva na kaljivost pri različnih osnovnih sestavah jekel. Danes lahko celo trdimo, da so lastnosti jekla, ki jih ugotovimo s preizkušanjem kaljivosti jedra, v nekaterih primerih popolnoma neuporabne za ocenjevanje pričakovane kaljivosti cementirane plasti.

Poznati moramo kaljivost jedra in kaljivost cementirane plasti. Samo poznanje te kombinacije nam omogoča izbiro optimalne vrste jekla, določanje in kontroliranje pogojev tehnološkega postopka za določene namene in za doseganje zahtevanih lastnosti.

V zadnjem desetletju se je zelo intenzivno razvijala metodika preizkušanja kaljivosti cementiranih jekel. Danes smo na tem področju tudi pri nas dosegli tako stopnjo razvoja, da smo se z raziskavami prepričali o vrednosti nove metode preizkušanja obrobne kaljivosti, obenem pa je prišel čas, da pogoje preizkušanja poenotimo na tak način, da bodo mogoče medsebojne primerjave rezultatov tako pri raziskovalnem, kakor tudi pri kontrolnem preizkušanju.

Za metodo preizkušanja kaljivosti cementirane plasti se je že udomačilo ime preizkušanje obrobne kaljivosti.

Razvoj metode je poznan^{1,2}, zato se bomo v nadaljnjem omejili le na osnovni namen članka — na tipizacijo postopka in pogojev preizkušanja ter na nekatere praktične rezultate preizkušanja, ki ilustrirajo uporabnost metode za medsebojne primerjave lastnosti različnih vrst jekel.

Postopek preizkušanja obrobne kaljivosti cementiranih jekel

Osnovni princip metode je določanje kaljivosti cementirane plasti na jominyjevi probi, cementirani v ostrem sredstvu. Po čelnem kaljenju se nato jominyjeva proba zbrusi do različnih globin cementirane plasti, ustrezno paralelno določenim vsebnostim ogljika. S tem določamo odvisnost trdote od ohlajevalne hitrosti in obenem od vsebnosti ogljika. Kemijsko določanje krivulje naogljichenja s stopenjskim struženjem, nato pa brušenje jominyjeve probe do različnih globin cementirane plasti, ki jih določimo iz krivulje naogljichenja, je precej zamudno in ovira širšo uporabnost metode. S številnimi poizkusi smo ugotovili, da pri natančno tipiziranih pogojih cementacije prob določevanje krivulje naogljichenja praktično ni potrebno, ker krivulje naogljichenja pri posameznih vrstah jekel s svojim odstopanjem ne presegajo natančnosti drugih meritev.

V literaturi in pri naših dosedanjih raziskavah v železarni Ravne in na Metalurškem inštitutu so bili pogoji preizkušanja tako različni, da rezultatov in ugotovljenih značilnih lastnosti skoraj ni mogoče med seboj primerjati. Prav to nas je navedlo k temu, da predlagamo v prihodnje preizkušanje pri enotnih pogojih, ki smo jih v dosedanjih raziskavah ugotovili za najprimernejše. Pri teh pogojih smo v železarni Ravne že preizkusili vse glavne vrste jekel za cementacijo.

Postopek in obseg preizkušanja za eno šaržo določene vrste jekla je odvisen od namena preizkušanja in od dokumentacije že izvršenih raziskav lastnosti te vrste jekla. Pri tem gre torej lahko za širšo raziskavo lastnosti in uporabnosti neke vrste jekla ali pa samo za kontrolo enakomernosti kakovosti neke vrste jekla, za katerega so osnovne značilne lastnosti že poznane. Upoštevati moramo tudi način kaljenja v proizvodnji, za katerega želimo izvršiti preizkušanje obrobne kaljivosti. Pogoji preizkušanja so seveda za direktno kaljenje drugačni kot za indirektno kaljenje.

Poglejmo najprej prvo varianto, ki predstavlja postopek raziskave obrobne kaljivosti z najširšim obsegom, ko želimo pri nepoznanem jeklu preizkusiti kaljivost v celotnem območju.

Popolna raziskava kaljivosti cementiranega jekla

1. Priprava prob

Kaljivost je značilna lastnost šarže neke vrste jekla, zato se vedno nanaša preizkušanje na eno šaržo in se običajno izvaja pri proizvajalcu jekla že v medfazni kontroli polizdelkov. Za popolno raziskavo je potrebno skovati palico $\varnothing 30$ mm, dolžine 800 mm in to po kovanju obvezno normalizirati na 900°C s časom avstenitizacije 30 minut. Pri nekaterih legiranih vrstah jekla je potrebno za olajšanje mehanske obdelave prob še žarjenje na 600°C , ca. 1 uro. Nato sledi mehanska izdelava prob:

- 4 standardne jominyjeve probe in
- 2 valjčka $\varnothing 25$ mm dolžine 150 mm.

Pri vseh probah je predpisana toleranca premiera $\pm 0,05$ mm.

2. Kaljivost jedra

Za preizkušanje kaljivosti jedra izvršimo standardni jominyjev preizkus za dve različni temperaturi avstenitizacije:

— 925°C za »direktno kaljenje« jekla s temperature cementacije;

— normalno standardizirano temperaturo, ki ustreza za kaljenje jedra — za »indirektno kaljenje« posameznih vrst jekla za cementacijo. Kot standardni temperaturi za preizkušanje pri pogojih indirektnega kaljenja uporabljamo le dve temperaturi:

- 790°C za jekla Č.1220, Č.1221,
- 820°C za jekla Č.4320, Č.4321, Č.4720, Č.4721, Č.5420, Č.5421, Č.7420.

Za ta jekla pri navedenih pogojih indirektnega kaljenja ima železarna Ravne izdelane pasove garantirane kaljivosti. Mimogrede naj omenimo, da določanje kaljivosti jedra po jominyjevi metodi v zadnjem času zelo izpodriva preizkušanje trdote po slepem kaljenju jekel za cementacijo. Pri cementiranih probah merjenje trdote po Rockwellu ni mogoče, zato se zaradi enotnosti celotne dokumentacije največkrat tudi pri meritvah trdot kaljivosti osnovnega jekla uporablja merjenje trdote po Vickersu z majhno obtežbo $HV_{10\text{ kg}}$. Tabele za pretvarjanje vrednosti trdote HV — HRC so večkrat precej različne, zato je potreben dogovor o uporabi določene tabele za pretvarjanje. Predlagamo, da se za pretvorbe uporablja tabela po DIN 50150.

Po Grossmann-Jominyjevi metodi² določimo idealni kritični premer D_1 za kaljivost jedra preiskovanega jekla.

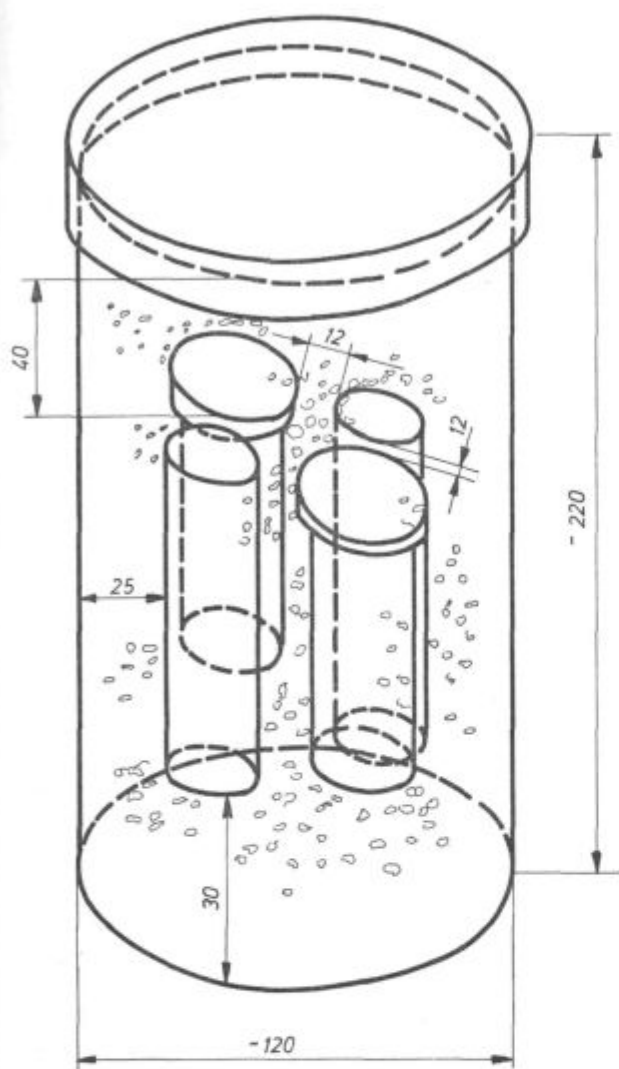
3. Cementacija prob

Za reproduktivnost rezultatov preizkušanja je odločilne važnosti, da so pogoji cementiranja prob točno precizirani oziroma standardizirani. Na osnovi dosedanjih raziskav predlagamo naslednje standardizirane pogoje:

— za cementacijo je treba uporabiti ostro trdno sredstvo. Najenakomernejšo cementacijo smo dosegli z Duferrit-Granulat 30 z dodatkom 8 % svežega, neosušenega BaCO_3 za aktiviranje. Tako sredstvo je potrebno zato, ker je potrebno v cementirani plasti doseči vsaj 1,1 % C na globini 0,2 mm pod površino cementirane probe. Dodatek neosušenega karbonata se priporoča na osnovi izkušenj Metalurškega inštituta v Ljubljani^{3,4}, kjer so ugotovili, da primešani osušeni karbonat povzroča lokalno neenakomerno cementacijo. Pri teh poizkusih je potrebno uporabiti vedno sveže sredstvo za cementacijo.

— v zaboj za cementacijo vložimo vedno dve jominyjevi probi in dva valjčka $\varnothing 25 \times 150$ mm po skici na sliki 1. Pri pakiranju je treba paziti, da

so posamezne probe od vseh strani obdane z najmanj 12 do 15 mm debelim slojem sredstva za cementacijo. Zaboječek je treba zamazati pri pokrovu tako, da je preprečen dostop zraka.



Slika 1
Pakiranje prob za cementacijo

— Temperatura cementacije mora biti standardna 925°C. Za določeno peč je potrebno preizkusiti in nato predpisati standardizirani postopek ogrevanja, držanja na temperaturi in hlajenja. Priporočljivo je, da se zaboječek vloži v peč na temperaturi 400 do 450°C, nato pa se segreva na temperaturo cementacije 925°C. Z merjenjem temperature s termoelementom v sredini zaboječka je potrebno določiti čas ogrevanja in čas, ki je potreben za izenačevanje temperature v zaboječku, kakor tudi razliko temperature peči in temperature v sredini zaboječka. Upoštevajoč vse to mora potekati cementacija pri 925°C 9 ur po izenačitvi temperature.

Po cementaciji vzamemo iz zaboječka jominyjevo probo, namenjeno za direktno kaljenje, vse

ostale probe pa se ohlajajo v zaboječku na mirnem zraku. Pri nekaterih vrstah jekla je potrebno za boljše struženje po ohladitvi kratko žarjenje na 600°C ca. 1 uro.

4. Kaljenje cementiranih jominyjevih prob

Takoj po cementaciji 9 ur na 925°C se vzame eno jominyjevo probo iz zaboječka in se z njo po standardnih predpisih za jominyjev poizkus kaljivosti izvede čelno kaljenje v ustrezni napravi. Važno je, da za prenos probe iz zaboječka na temperaturi 925°C do začetka čelnega kaljenja ne porabimo več kot 5 sekund. To je poizkus, ki je namenjen določanju kaljivosti cementirane plasti za pogoje »direktnega kaljenja«.

Po ohladitvi preostalih prob v zaboječku se druga jominyjeva proba v ustrezni zaščitni atmosferi s potencialom ogljika 1,1 do 1,2 % C ali v grafitnem loncu ogreje na temperaturo avstenitizacije za določanje kaljivosti pri pogojih »indirektnega kaljenja«. Tudi to probo čelno kalimo v skladu s standardnimi predpisi jominyjevega poizkusa.

5. Določevanje krivulje naogljichenja

Probni valjčki $\varnothing 25 \times 150$ mm služijo za določevanje krivulje naogljichenja, ki jih dobimo s kemijsko analizo ogljika v ostružkih, ki jih s struženjem pazljivo posnemamo po slojih. Vse analize je treba izvršiti v dveh paralelkah, zaradi česar sta potrebna dva valjčka.

Do globine 0,50 mm se posnema sloje v stopnjah po 0,1 mm, dalje do globine 3,0 mm pa sloje v stopnjah po 0,25 mm.

Pri struženju je treba zelo paziti, da se ostružki ne segrejejo, kar zagotovimo z manjšo hitrostjo rezanja in z manjšim pomikom. Pri struženju ni dopustno hlajenje, ker bi hladilno sredstvo motilo pri kemijski analizi ostružkov.

Poprečne vsebnosti ogljika nanašamo v diagram odvisnosti vsebnosti ogljika od globine cementirane plasti (glej primer na sliki 2).

Iz takih diagramov se določa grafično globine cementirane plasti, ki ustrezajo posameznim vsebnostim ogljika v odstotkih:

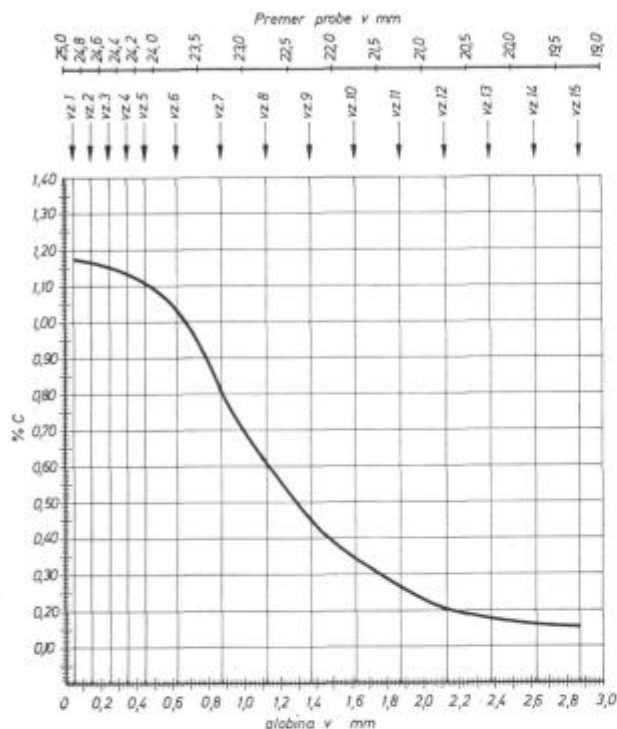
1,1 — 1,0 — 0,9 — 0,8 — 0,7 — 0,6 — 0,5 — 0,4 — 0,3 — vsebnost ogljika v osnovnem jeklu.

6. Brušenje jominyjevih prob

Na osnovi krivulje naogljichenja se določi za posamezne vsebnosti ogljika ustrezne globine cementirane plasti, do katerih je potrebno jominyjeve probe zbrusiti za merjenje trdot vzdolž probe. Tako na posameznih vzdolžnih brušenih ploskvah izmerjene trdote ustrezajo pripadajočim konstantnim vsebnostim ogljika.

Brušenje mora biti izredno pazljivo in precizno, ker lokalno popuščanje zaradi pregretja pri brušenju privede do napačnih rezultatov. Pri brušenju mora biti zato zagotovljeno zadostno hlajenje.

Na površini prob pride do delnega razogljichenja ali pa do neenakomernega naogljichenja, zato so meritve trdote v površinski plasti do globine ca. 0,2 mm praktično neuporabne. Ta globina predstavlja najmanjšo debelino plasti, ki se posamezno vzdolž jominyjeve probe z brušenjem. Omenjene neenakomernosti na površini cementirane plasti pa nimajo pomembnega vpliva na kaljivost cementirane plasti pod površinsko plastjo.



Slika 2
Krivulja naogljichenja za jeklo C.1221

Če se na brušeni vzdolžni ploskvi meri trdota, se lahko na istem položaju po meritvi proba brusi še na večjo globino za merjenje trdote pri nižjem nivoju vsebnosti ogljika, pri tem pa je potrebno odstraniti plast debeline najmanj 0,5 mm, da bi se izognili vplivu predhodnih meritev.

7. Merjenje trdote

Na različnih globinah cementirane plasti, ki ustrezajo določenim vsebnostim ogljika, se meritve trdote izvajajo po Vickersu z majhno obtežbo $HV_{5\text{kp}}$ vzdolž jominyjeve probe. (V predhodnih raziskavah smo merili trdote $HV_{1\text{kp}}$, pri čemer pa smo ugotovili, da hrapavost brušene površine otežkoča natančnost meritve trdot.)

Meritve trdot se normalno v oddaljenosti 16 mm od kaljenega čela izvajajo na vsaka 2 mm, dalje pa na vsake 4 mm. Ta način dopušča tudi dodatna merjenja, če je potek krivulje trdot neenakomeren. Meritve trdot pridejo praktično v poštev le do oddaljenosti 50 mm od kaljenega čela. V železarni Ravne vnašamo rezultate meritev trdot neposredno v ustrezen formular (slika 3), ki je prilagojen

načinu merjenja in vsebuje vse podatke, potrebne za dokumentacijo poizkusa.

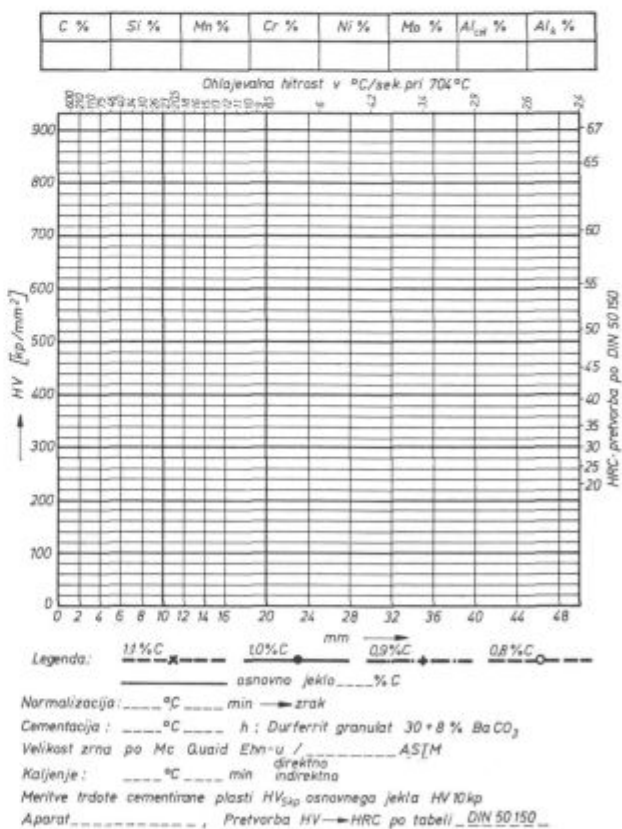
Naj omenimo, da za brušenje jominyjevih prob in merjenje trdot lahko uporabljamo dva načina, ki sta prikazana na sliki 4. Obe varianti sta razmeroma enakovredni: za varianto A se odločimo takrat, ko lahko pri brušenju zagotovimo zahtevano natančnost; za varianto B pa takrat, ko želimo brušenje poenostaviti, lahko pa izvedemo meritve trdot z večjo natančnostjo. V železarni Ravne smo se za nadaljnje poizkuse odločili za postopek variante A.

8. Shema postopkov preizkušanja obrobne kaljivosti cementiranih jekel za določene namene

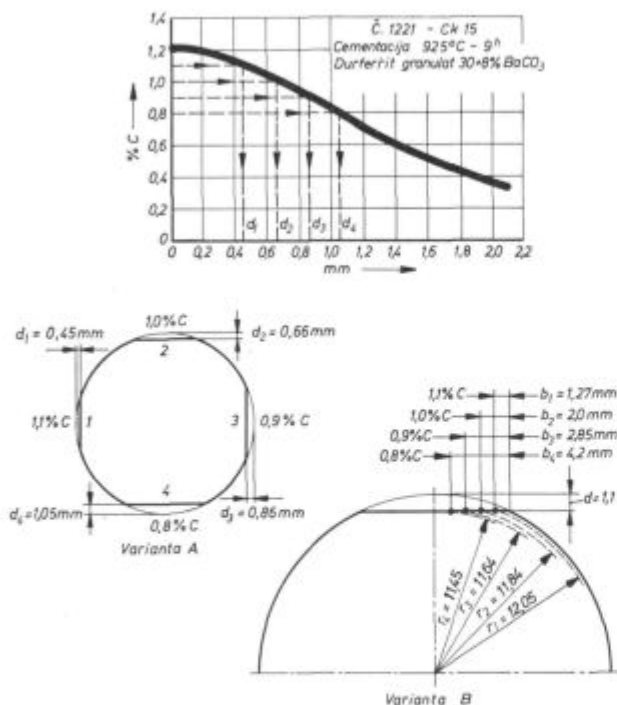
Rezultati dosedanjih raziskav obrobne kaljivosti so pokazali, da so odločilnega pomena standardizirani pogoji preizkušanja, zato smo izdelali za 6 možnih variant po namenu preiskave sheme, ki naj bi posamezne postopke predpisale na tak način, da bi bili pogoji preizkušanja čimbolj enotni in rezultati med seboj res primerljivi.

Na sliki 5 je prikazan postopek najširše raziskave obrobne kaljivosti, ki smo ga pravkar v celoti opisali.

Če nas pri določenem jeklu zanima le obrobna kaljivost pri pogojih direktnega kaljenja (slika 6), odpade v shemi na sliki 5 veja preizkušanja neme-

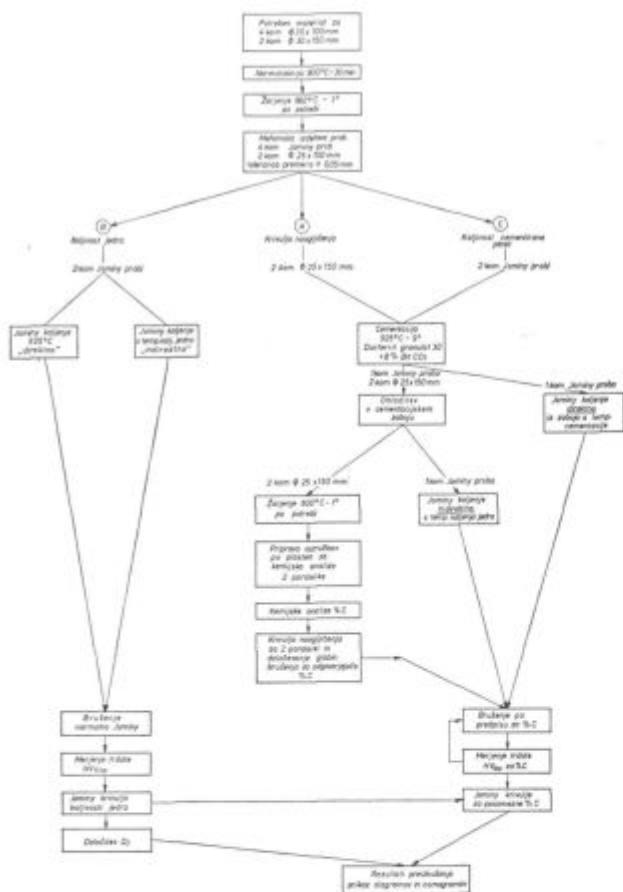


Slika 3
Formular železarne Ravne za dokumentacijo meritev trdot pri preizkušanju obrobne kaljivosti (originalni format A)



Slika 4

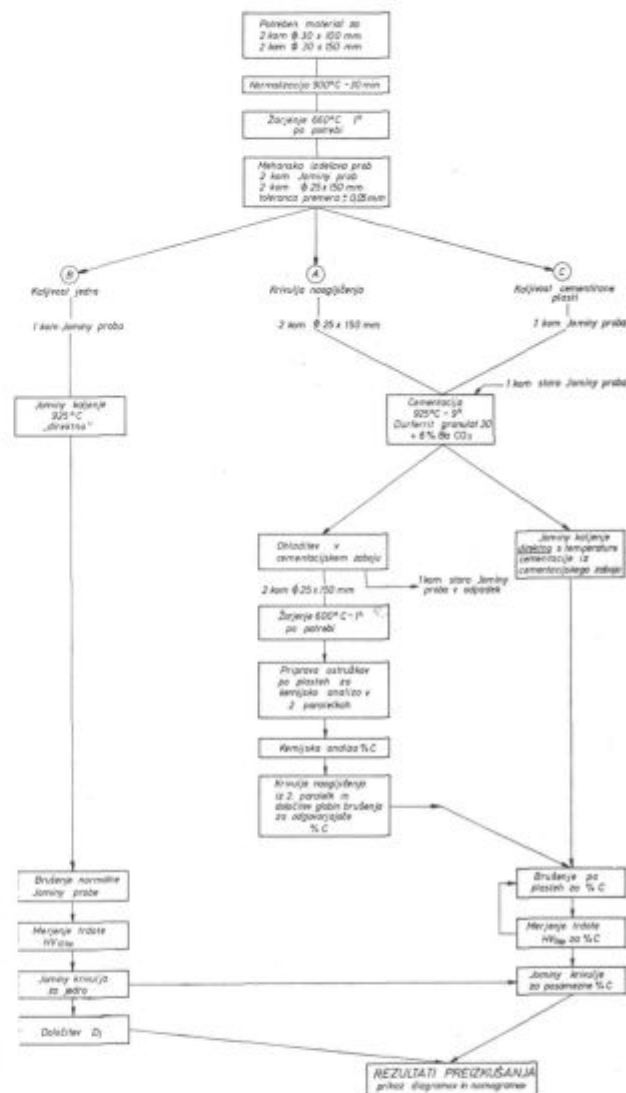
Primer krivulje naogljčenja in predpisa za brušenje ter merjenje trdot pri preizkusu obrobne kaljivosti



Slika 5

Shema standardiziranega postopka preizkušanja za popolno raziskavo obrobne kaljivosti cementiranega jekla

njena indirektnemu kaljenju. Opozarjamo pa, da je treba pri cementaciji obdržati odnos teže prob in teže sredstva za cementacijo, zato v zabojček vložimo staro jominyjevo probo ali pa nek kos ustreznih dimenzij, ki ga nato zavržemo.



Slika 6

Shema standardiziranega postopka preizkušanja pri raziskavi obrobne kaljivosti cementiranega jekla samo za direktno kaljenje

Postopek se ustrezno spremeni, če nas pri jeklu zanima le obrobna kaljivost pri pogojih indirektnega kaljenja (slika 7).

Slika 8 prikazuje shemo postopka, kakršnega izvajamo, če obrobno kaljivost jekla poznamo, želimo pa kontrolirati le enakomernost in nivo karakterističnih lastnosti jekla — v tem primeru obrobne kaljivosti.

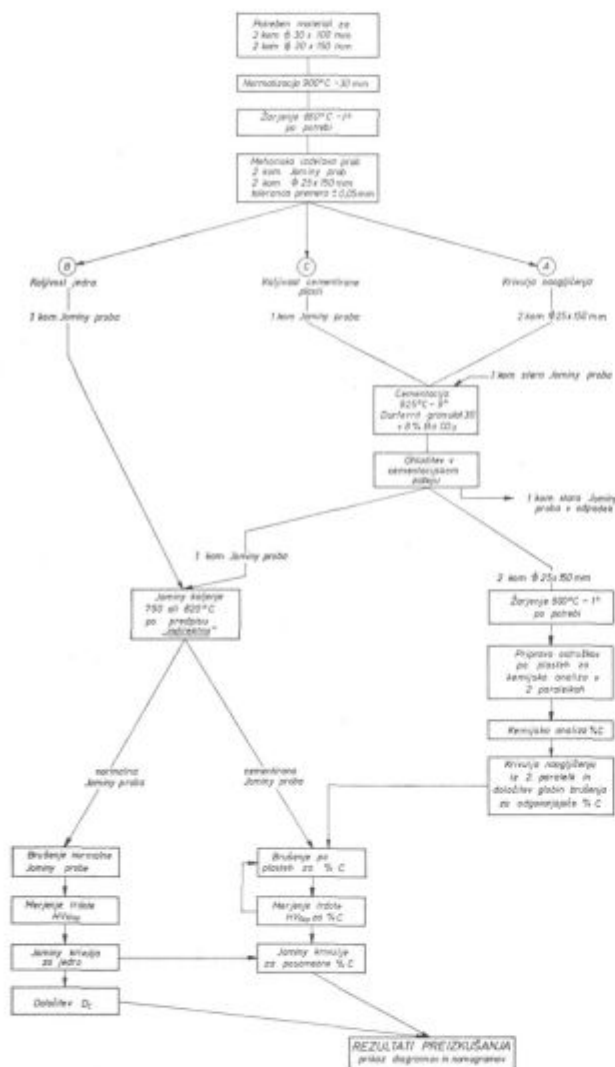
Če imamo za določeno jeklo dovolj podatkov preizkušanja, potem lahko ob standardiziranih pogojih cementacije z zadostno natančnostjo vnaprej določimo pogoje brušenja, ne da bi ugotavljali

krivuljo naogljichenja z analizo ostružkov. Krivuljo naogljichenja izdelamo v takih primerih samo po potrebi v slučaju ugotovljenih nenormalnosti. Zato seveda cementiramo valjčke za določanje krivulje naogljichenja, struženje in kemijske analize pa izvršimo le v slučaju potrebe za izvršitev določenih naknadnih korektur. Ta del preiskave je na sliki 8 prikazan črtkano. Precej obsežno preizkušanje je namreč pokazalo, da se krivulje naogljichenja pod standardiziranimi pogoji cementacije zelo malo razlikujejo med seboj.

Za kontrolno preizkušanje nas prav tako ne zanima ugotavljanje kaljivosti za vse vsebnosti ogljika. Normalno se omejimo le na sledeče: 1,1 % C — 1,0 % C — 0,9 % C — 0,8 % C in % C osnovne sestave jekla.

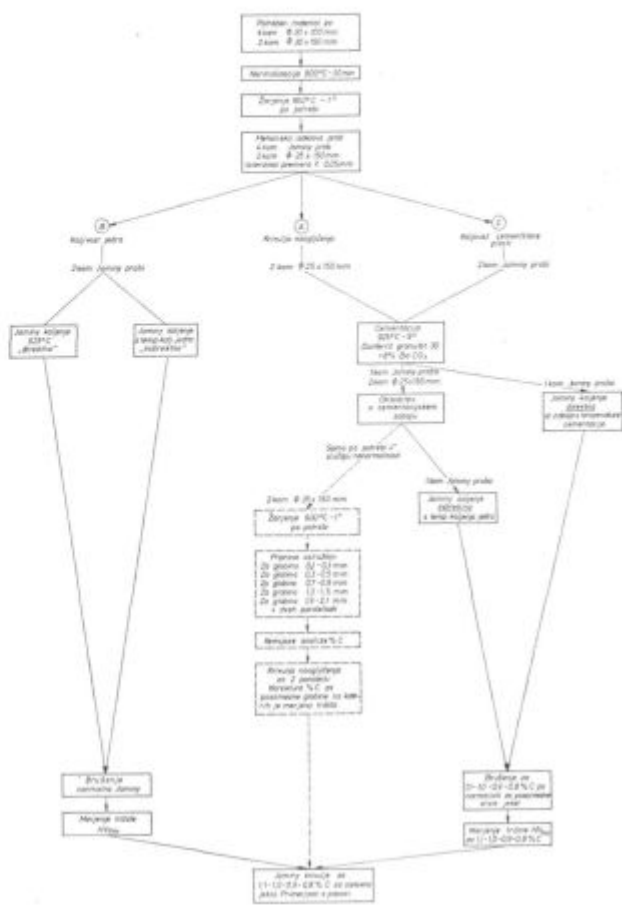
Standardiziranje postopka brušenja cementiranih jominyjevih prob zelo olajša laboratorijsko delo pri preizkušanju obrobne kaljivosti, ker nismo odvisni od priprave ostružkov in kemijske

analize. Tudi v slučaju, da je krivuljo naogljichenja potrebno kontrolirati, izvršimo to po skrajšanem postopku, pri katerem zadošča 5 vzorcev ostružkov, kakor je to prikazano na shemi.



Slika 7

Shema standardiziranega postopka preizkušanja pri raziskavi obrobne kaljivosti cementiranega jekla samo za indirektno kaljenje



Slika 8

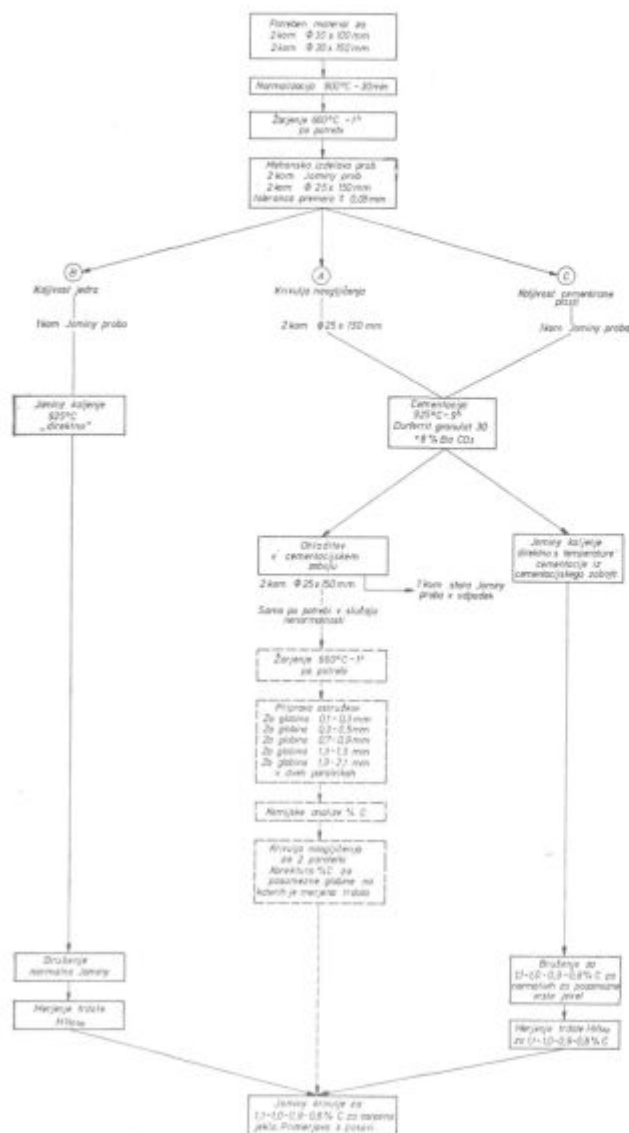
Shema standardiziranega postopka preizkušanja za kontrolo enakomernosti obrobne kaljivosti cementiranega jekla pri direktnem in indirektnem kaljenju

Na slikah 9 in 10 sta zopet prikazani varianti z ozirom na namen preiskave. Postopek na sliki 9 pride v poštev, kadar nas zanima le direktno kaljenje, postopek na sliki 10 pa takrat, kadar nas zanima le indirektno kaljenje.

Prikazovanje rezultatov preizkušanja

1. Jominyjeve krivulje za različne vsebnosti ogljika predstavljajo način neposrednega prikazovanja rezultatov preizkušanja. Tako lahko prikazujemo jominyjeve krivulje za vse vsebnosti ogljika od najvišje v cementirani plasti do vsebnosti ogljika osnovnega jekla. Za medsebojne primerjave se kot standardne vsebnosti ogljika največkrat uporabljajo 1,1 — 1,0 — 0,9 — 0,8 % C. Kaljivost za druge vsebnosti ogljika se določa in prikazuje le po potrebi in interesantnosti.

Iz takih diagramov vidimo velike razlike kaljivosti osnovnega jekla, še bolj pa razlike kaljivosti cementirane plasti pri raznih vrstah jekla. Tako lahko jekla razdelimo v:



Slika 9

Shema standardiziranega kontrolnega postopka pri preizkušanju obrobne kaljivosti cementiranega jekla samo za direktno kaljenje

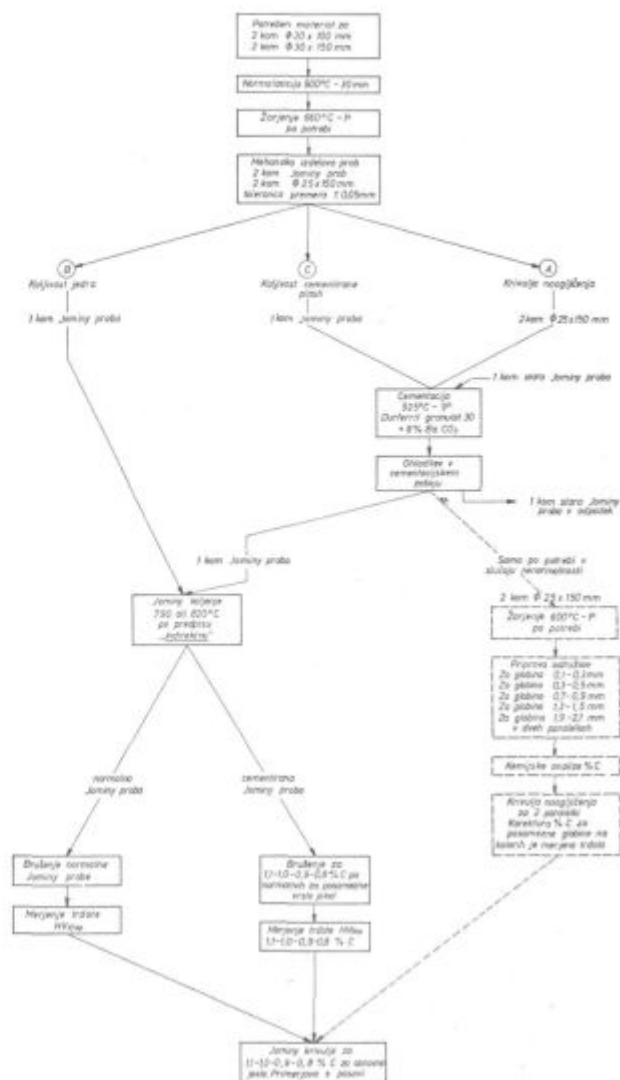
— skupino jekel slabe kaljivosti (nelegirana jekla za cementacijo in jekla z vsebnostjo mangana do 0,9 % ter molibdena do 0,4 %). Prevojna točka jominyjeve krivulje osnovnega jekla je okrog 5 do 6 mm od kaljenega čela probe.),

— skupino jekel močne kaljivosti (višje legirana jekla tipov Cr-Ni-Mo, Cr-Mn-Mo, Cr-Ni, Cr-Mo z vsebnostjo mangana nad 0,9 % ali molibdena nad 0,4 %),

— skupino jekel srednje kaljivosti (jekla, ki so po karakteristični kaljivosti in po kemijski sestavi med navedenima skupinama).

Pri jeklih vseh teh različnih skupin je lahko začetna trdota za enake vsebnosti ogljika praktično enaka.

Za olajšanje ocenjevanja kaljivosti cementiranih jekel na osnovi jominyjevih krivulj za različne vsebnosti ogljika prikazuje slika 11 shematično



Slika 10

Shema standardiziranega kontrolnega postopka pri preizkušanju obrobne kaljivosti cementiranega jekla samo za indirektno kaljenje

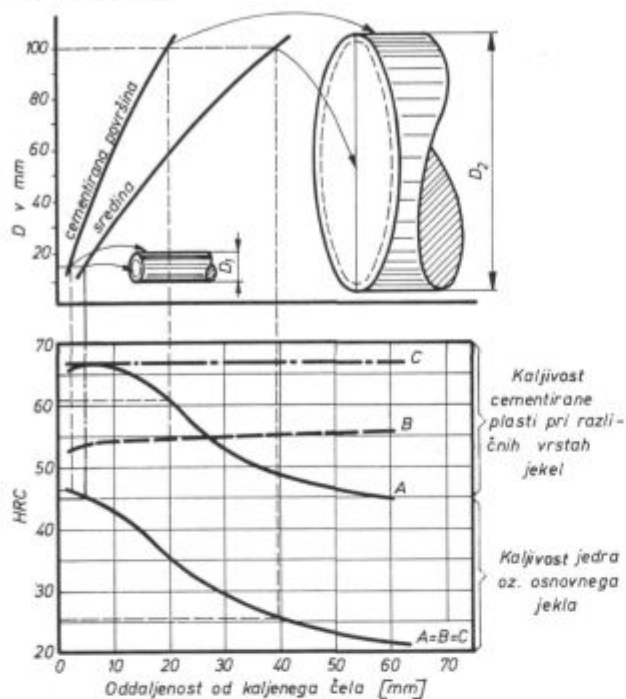
primerjavo treh tipičnih jominyjevih krivulj cementiranih jekel različnih vrst. Pri tem gre predvsem za primerjavo sposobnosti zakaljenja in prekaljivosti, pri čemer ob teh treh ekstremnih primerih poseben komentar ni potreben. Zelo važno pa je dejstvo, da je lahko ob tako različni kaljivosti cementirane plasti kaljivost osnovnega jekla praktično enaka. To nam potrjuje vrednost in potrebo obravnavane metode preizkušanja.

Na slikah 12 do 14 so podani rezultati preizkušanja obrobne kaljivosti jekla C.1221 in C.5421.

Prikazovanje jominyjevih krivulj za vse vsebnosti ogljika postane večkrat nepregledno, zato se največkrat prikazujejo jominyjeve krivulje samo za izbrane vsebnosti ogljika, kakor to prikazujejo primeri na slikah 15 do 17 za tipične vrste jekel za cementacijo.

2. Jominyjeve krivulje za določene globine cementirane plasti se uporabljajo le v primerih naknadno korigiranih vsebnosti ogljika. Ta način

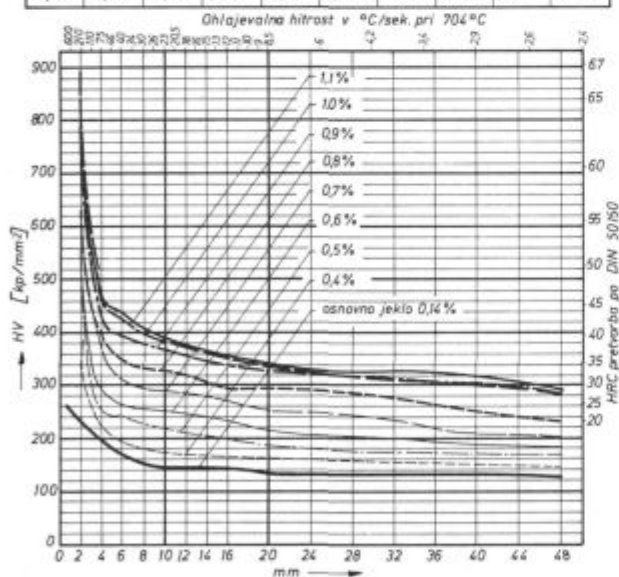
prikazovanja pa pride v poštev posebno v primerih kontrolnih preiskav, pri čemer gre predvsem za enakomernost kaljivosti v določeni globini cementirane plasti.



Slika 11

Shema kaljivosti cementirane plasti in jedra v zvezi s trdoto na površini in v sredini palic različnih premerov⁴

C %	Si %	Mn %	Cr %	Ni %	S %	Cu %	P %	V %	Al _{tot} %
0,14	0,25	0,37	0,03	0,02	0,026	0,13	0,015	0,01	0,029

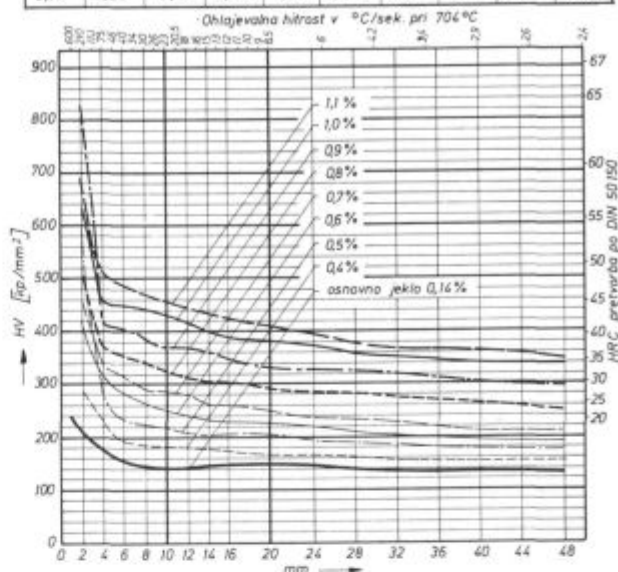


Normalizacija: 900 °C 30 min → zrak
 Cementacija: 925 °C 9 h; Durfermit granul 30 + 8 % Ba CO₃
 Velikost zrna po Mc Quaid Ehn-u / 6-7 ASTM
 Kaljenje: 790 °C 30 min. direktno
 Meritve trdote cementacije plasti HV_{0,05} osnovnega jekla HV_{0,05} 10 kp
 Aparat: Vickers Pretvorba HV → HRC po tabeli DIN 50150

Slika 12

Obrobna kaljivost cementiranega jekla Č.1221 (Ck 15) pri pogojih indirektnega kaljenja

C %	Si %	Mn %	Cr %	Ni %	S %	Cu %	P %	V %	Al _{tot} %
0,14	0,25	0,37	0,03	0,02	0,026	0,13	0,015	0,01	0,029

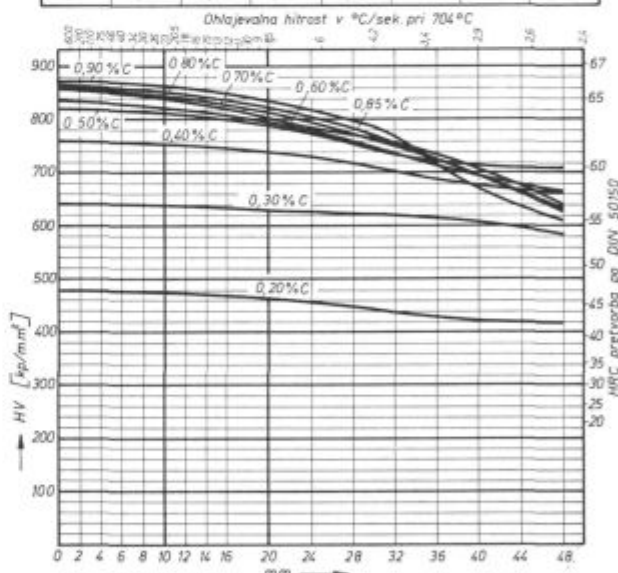


Normalizacija: 900 °C 30 min → zrak
 Cementacija: 925 °C 9 h; Durfermit granul 30 + 8 % Ba CO₃
 Velikost zrna po Mc Quaid Ehn-u / 6-7 ASTM
 Kaljenje: 925 °C min. direktno
 Meritve trdote cementirane plasti HV_{0,05} osnovnega jekla HV_{0,05} 10 kp
 Aparat: Vickers Pretvorba HV → HRC po tabeli DIN 50150

Slika 13

Obrobna kaljivost cementiranega jekla Č.1221 (Ck 15) pri pogojih direktnega kaljenja

C %	Si %	Mn %	Cr %	Ni %	Mo %	Al _{tot} %	Al ₀ %
0,20	0,30	0,58	2,03	2,05	-	0,010	0,006

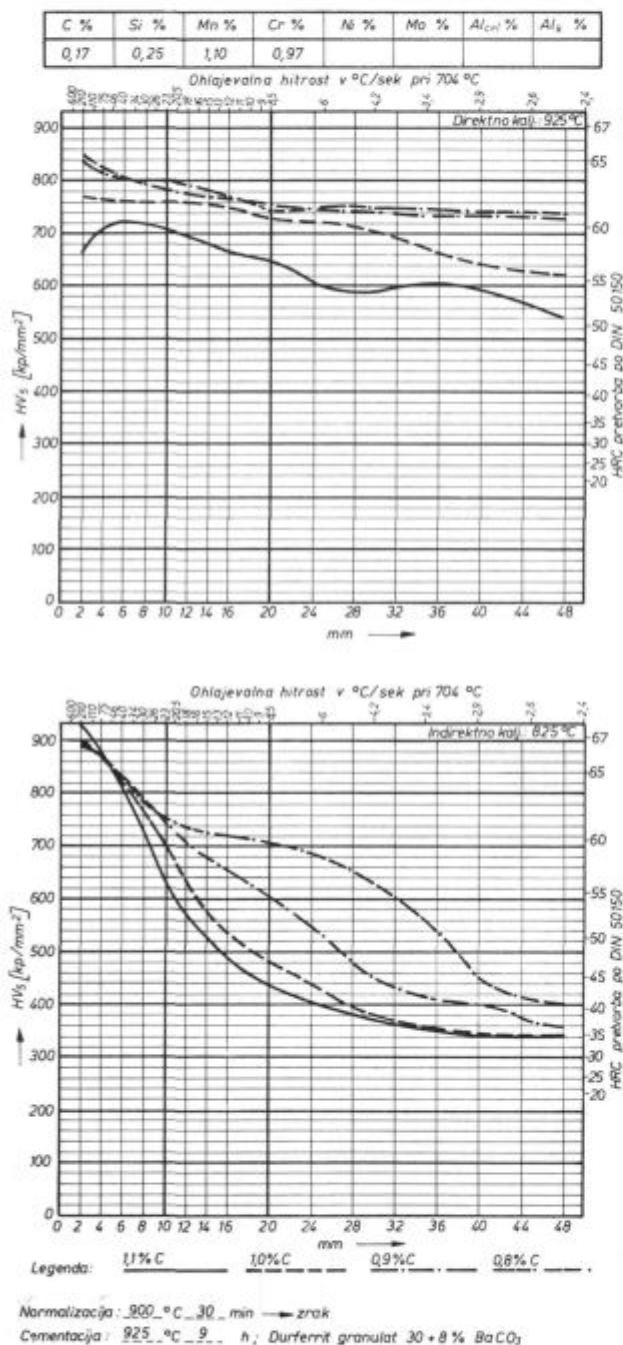


Normalizacija: 900 °C 30 min → zrak
 Cementacija: 900 °C 9 h; Durfermit granul 30 brez dodatkov (2/3 svež in 1/3 enkrat rabljen)
 Velikost zrna po Mc Quaid Ehn-u / 6-7 ASTM
 Kaljenje: 825 °C min. indirektno
 Meritve trdote cementirane plasti HV_{0,05} osnovnega jekla HV_{0,05} 10 kp
 Aparat: Leitz Rutimek Pretvorba HV → HRC po tabeli DIN 50150

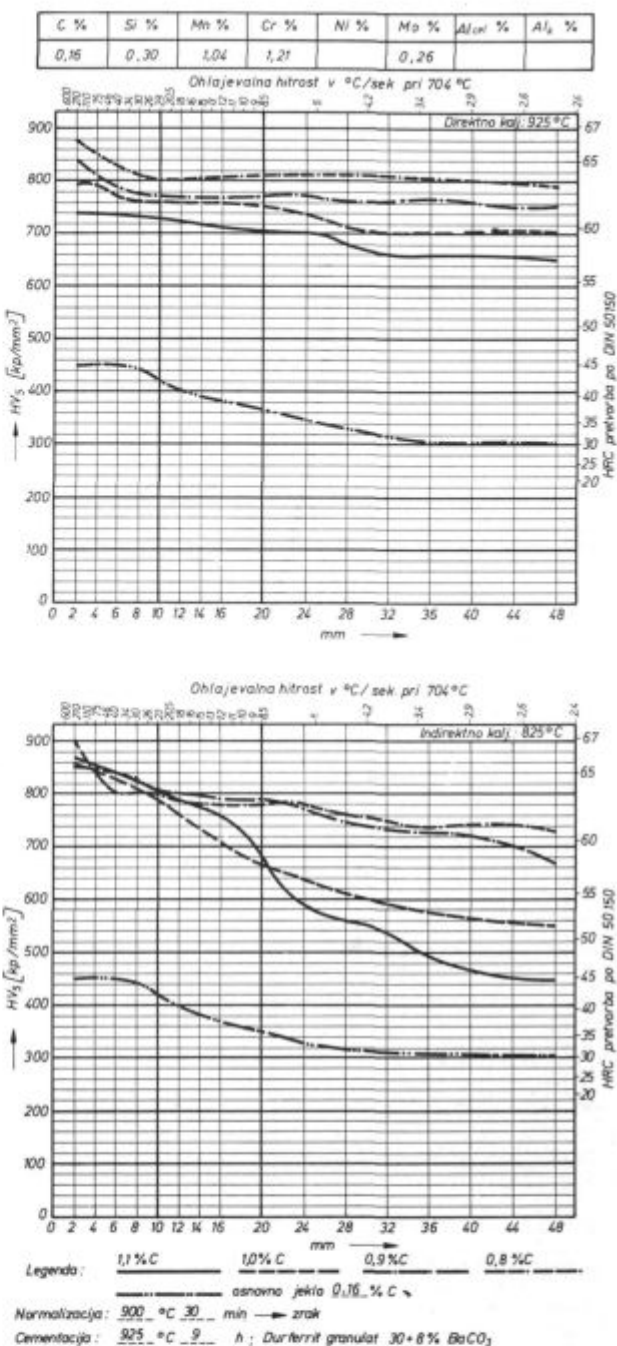
Slika 14

Obrobna kaljivost cementiranega jekla Č.5421 (ECN 200) pri pogojih indirektnega kaljenja

3. Nomogrami za primerjavo trdot v odvisnosti od vsebnosti ogljika pri določenih hitrostih ohlajevanja oz. pogojih kaljenja nam precej olajšajo medsebojne primerjave pri izbiri najustreznejše vrste jekla in toplotne obdelave. Pri tem načinu prikazovanja so podane trdote za določene oddaljenosti od kaljenega čela (na sliki 18 npr. za 2, 20 in 40 mm). Trdota pri 2 mm karakterizira sposobnost zakaljenja, trdota pri 20 in 40 mm pa sposobnost prekaljivosti. Na ta način se zelo jasno izražajo razlike med vrstami jekel in razlike med direktnim in indirektnim kaljenjem.



Slika 15
Obrobna kaljivost jekla Č.4320 (EC 80)

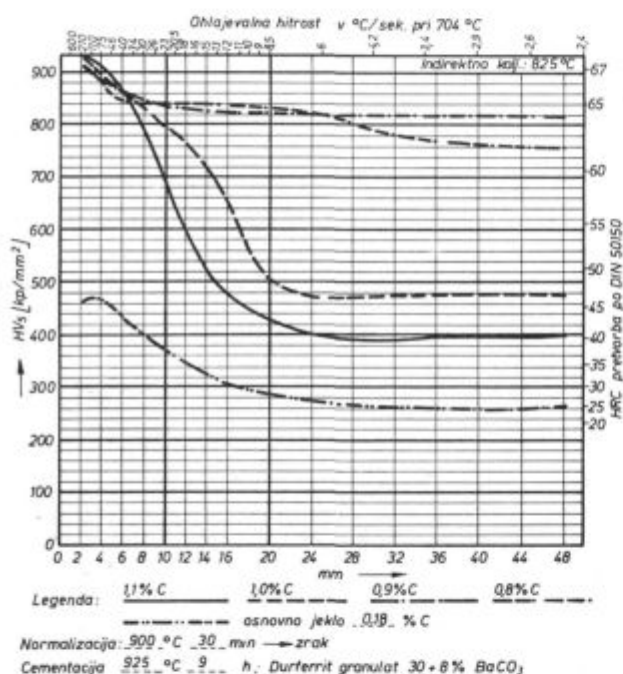
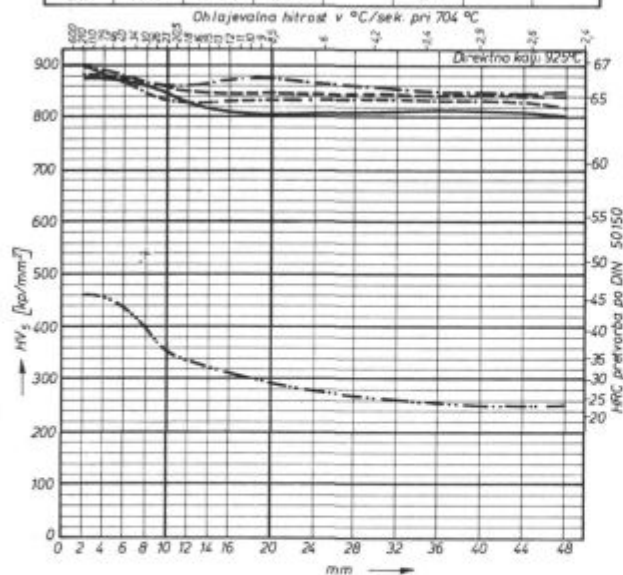


Slika 16
Obrobna kaljivost jekla Č.4720 (ECMo 80)

4. Nomogrami izotrdot

Podajanje rezultatov obrobne kaljivosti v obliki jominyjevih krivulj postane pri večjem številu različnih vsebnosti ogljika nepregledno. Nomogrami izotrdot nam podajajo mnogo bolj pregledno medsebojne odvisnosti vsebnosti ogljika, hitrosti ohlajevanja oz. oddaljenosti od kaljenega čela cementirane jominyjeve probe in trdote. Nomogram izotrdot konstruiramo iz jominyjevih krivulj za različne vsebnosti ogljika tako, da rišemo krivulje enakih trdot v koordinatnem sistemu, v katerem je na abscisi oddaljenost od kaljenega

C %	Si %	Mn %	Cr %	Ni %	Mo %	Al _{tot} %	Al ₈ %
0,18	0,24	0,63	0,48		0,59		



Slika 17

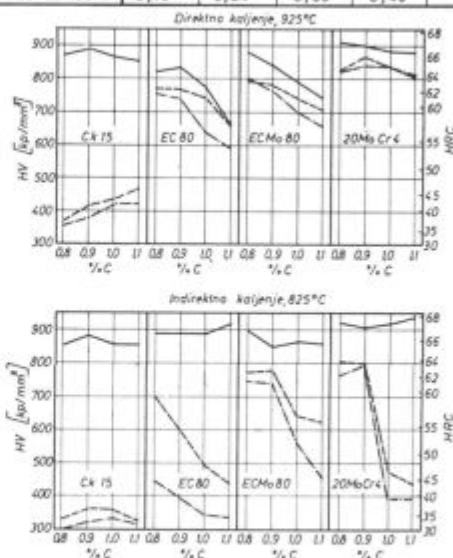
Obrobna kaljivost jekla C.7420 (20 Mo Cr 4)

čela jominyjeve probe oz. ohlajevalna hitrost, na ordinati pa vsebnost ogljika.

Na slikah 19 do 24 so podani nomogrami izotrdot za tipične vrste jekel za cementacijo pri pogojih indirektnega oz. direktnega kaljenja.

Pri nomogramih izotrdot moramo upoštevati, da krivulje za oddaljenosti od kaljenega čela, ki so manjše od 4 mm, niso zanesljive. Poleg netočnosti merjenja trdot v neposredni bližini kaljenega čela lahko v bližini vpliva tudi vsebnost ogljika, ker je jominyjeva proba cementirana tudi s čelne strani.

Vrsta jekla	% C	% Si	% Mn	% Cr	% Ni	% Mo
Č. 1221 Ck 15	0,16	0,23	0,53	—	—	—
Č. 4320 EC 80	0,17	0,25	1,10	0,97	—	—
Č. 4720 ECMo 80	0,16	0,30	1,04	1,21	—	0,26
Č. 7420 20MoCr4	0,18	0,24	0,63	0,48	—	0,59



Legenda	Oddaljenost od kaljenega čela Jominy probe	Ohlajevalna hitrost °C/sek pri 705 °C
—	2 mm	210 °C/sek
---	20 mm	85 °C/sek
----	40 mm	2,9 °C/sek

Slika 18

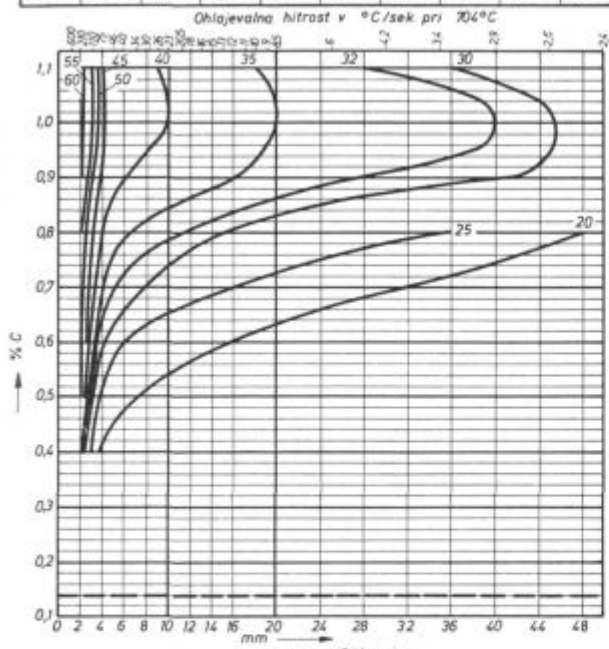
Primerjava trdot za različne vrste jekel, različne vsebnosti ogljika, različne ohlajevalne hitrosti in načine kaljenja

Poleg nomograma izotrdot se podaja še jominyjeve krivulje posameznih šarž ali pa pas garantirane kaljivosti osnovne sestave jekla.⁷ Iz teh podatkov se po Grossmann-Jominyjevem postopku² lahko določi idealni kritični premer kot značilni podatek kaljivosti jekla.

Primerjava nomogramov izotrdot različnih vrst jekla nam daje zelo dragocene informacije o uporabnosti in lastnostih različnih vrst jekel za cementacijo. Taka dokumentacija nam precej pomaga tudi pri izbiri jekla za določene namene in zahteve. Izdelava kompletnih nomogramov izotrdot zahteva precej obširno raziskavo, zato je izdelava teh nomogramov prepuščena v glavnem proizvajalcu jekla, ki na osnovi preiskav za večje število šarž izdela nomogram, ki informativno podaja karakteristične lastnosti določene vrste jekla. Posamezne šarže pa je treba posebej preizkusiti po skrajšanem postopku, če želimo v določenem območju podrobneje preizkusiti ali pa zagotoviti potrebne lastnosti. Iz rezultatov take skrajšane preiskave je nemogoče konstruirati nomogram izotrdot.

Tako kakor pri jominyjevih krivuljah imamo tudi pri nomogramih izotrdot možnost namesto vsebnosti ogljika na ordinati podajati globino cementacije, kar je v posebnih primerih zelo praktično.

C %	Si %	Mn %	Cr %	Ni %	S %	Cu %	P %	V %	Al _{cel} %
0,14	0,25	0,37	0,03	0,02	0,026	0,13	0,015	0,01	0,029

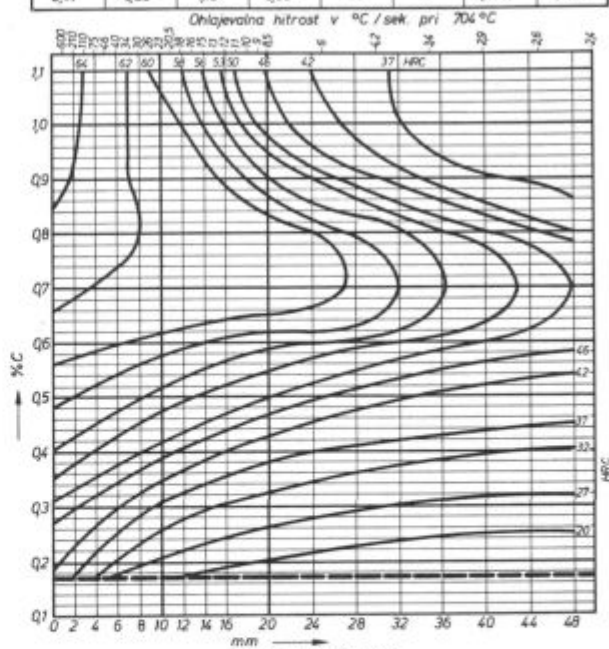


----- osnovno jeklo 0,14 % C
 Normalizacija: 900 °C 30 min. → zrak
 Cementacija: 925 °C 9 h; Durfernit granulit 30+8 % BaCO₃
 Velikost zrna po Mc Quaid Ehn-u / 5 ----- ASTM
 Kaljenje: 730 °C 30 min. direktno
 Meritve trdote cementirane plasti HV5kp osnovnega jekla HV10kp
 Aparat Vickers ----- Pretvorba HV → HRC po tabeli DIN 50150

Slika 19

Nomogram izotrdot jekla Ck.1221 (Ck 15) za indirektno kaljenje

C %	Si %	Mn %	Cr %	Ni %	Mo %	Al _{cel} %	Al _a %
0,17	0,25	1,13	0,99	-	-	0,008	0,004

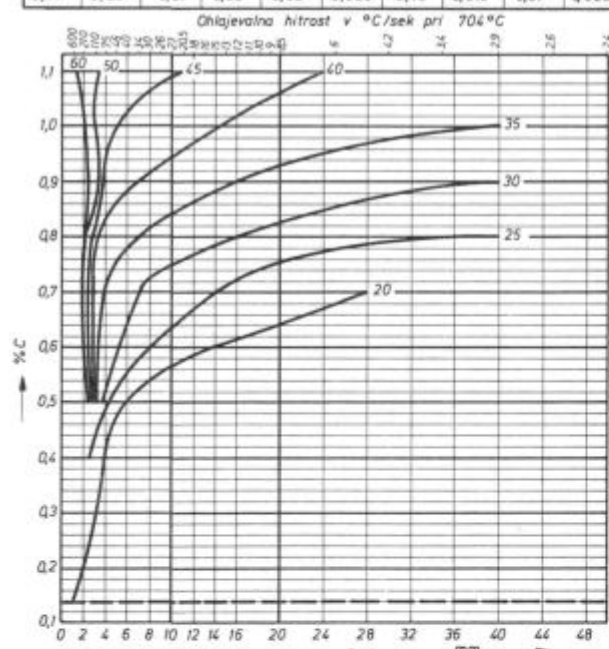


----- osnovno jeklo 0,17 % C
 Normalizacija: 900 °C 30 min. → zrak
 Cementacija: 900 °C 3+1 h; Durfernit granulit 30 brez dodatkov (2/3 svež in 1/3 enkrat rabljen)
 Velikost zrna po Mc Quaid Ehn-u / 7 ----- ASTM
 Kaljenje: 825 °C 30 min. indirektno
 Meritve trdote cementirane plasti HV5kp osnovnega jekla HV10kp
 Aparat Leitz Durimet ----- Pretvorba HV → HRC po tabeli DIN 50150

Slika 21

Nomogram izotrdot jekla C.4320 (EC 80) za indirektno kaljenje

C %	Si %	Mn %	Cr %	Ni %	S %	Cu %	P %	V %	Al _{cel} %
0,14	0,25	0,37	0,03	0,02	0,026	0,13	0,015	0,01	0,029

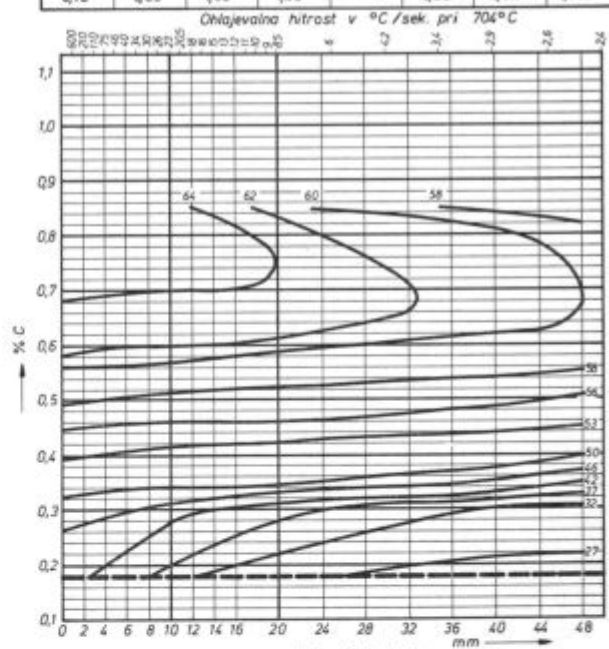


----- osnovno jeklo 0,14 % C
 Normalizacija: 920 °C 30 min. → zrak
 Cementacija: 925 °C 9 h; Durfernit granulit 30+8 % BaCO₃
 Velikost zrna po Mc Quaid Ehn-u / 5 ----- ASTM
 Kaljenje: 925 °C 30 min. direktno
 Meritve trdote cementirane plasti HV5kp osnovnega jekla HV10kp
 Aparat Vickers ----- Pretvorba HV → HRC po tabeli DIN 50150

Slika 20

Nomogram izotrdot jekla C.1221 (Ck 15) za direktno kaljenje

C %	Si %	Mn %	Cr %	Ni %	Mo %	Al _{cel} %	Al _a %
0,18	0,39	1,00	1,06	-	0,26	0,011	0,006

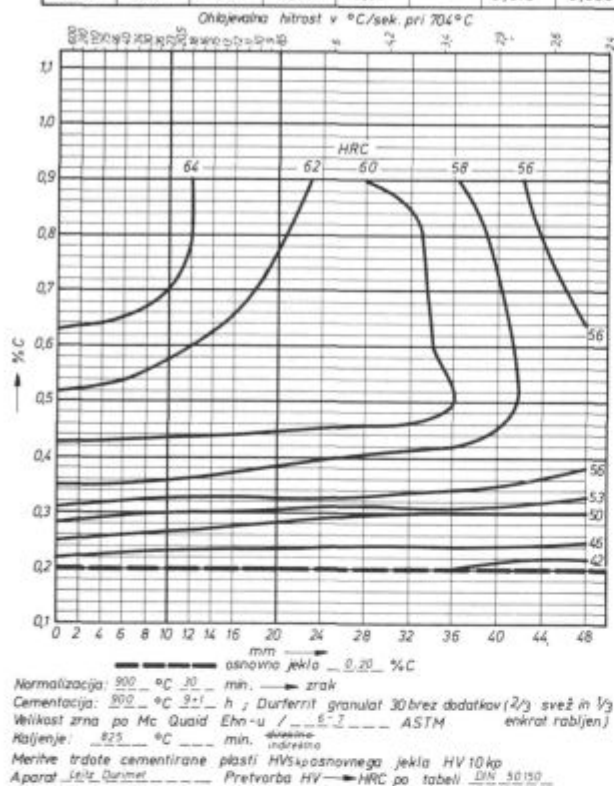


----- osnovno jeklo 0,18 % C
 Normalizacija: 900 °C 30 min. → zrak
 Cementacija: 900 °C 3+1 h; Durfernit granulit 30 brez dodatkov (2/3 svež in 1/3 enkrat rabljen)
 Velikost zrna po Mc Quaid Ehn-u / 7 ----- ASTM
 Kaljenje: 825 °C 30 min. indirektno
 Meritve trdote cementirane plasti HV5kp osnovnega jekla HV10kp
 Aparat Leitz Durimet ----- Pretvorba HV → HRC po tabeli DIN 50150

Slika 22

Nomogram izotrdot jekla C.4720 (ECMo 80) za indirektno kaljenje

C %	Si %	Mn %	Cr %	Ni %	Mo %	Al _{tot} %	Al _k %
0,20	0,30	0,58	2,03	2,05	—	0,010	0,006



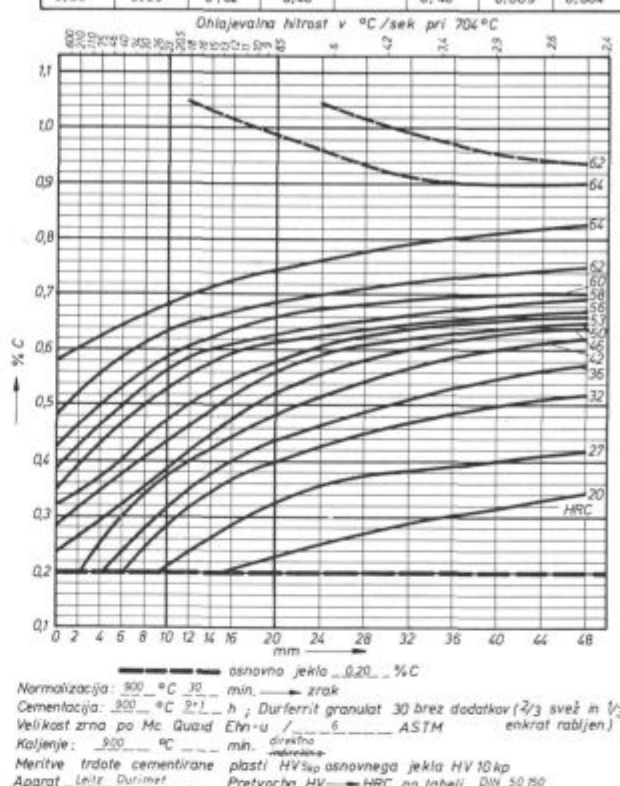
Slika 23
Nomogram izotrdot jekla C.5421 (ECN 200) za indirektno kaljenje

Praktični pomen preizkušanja kaljivosti cementiranih jekel in uporabe nomogramov izotrdot

Vse krivulje izotrdot kažejo neki maksimum jominyjeve oddaljenosti od kaljenega čela probe oz. minimum ohlajevalne hitrosti pri določeni vsebnosti ogljika, ki je značilna za dano vrsto jekla. Večkrat je sicer ta maksimum izven območja prikazanega nomograma izotrdot. Ta značilna vsebnost ogljika, pri kateri se pojavlja maksimum, je v določenem območju praktično enaka za vse krivulje izotrdot določenega jekla. Vsebnost ogljika, pri kateri se pojavlja maksimum krivulj izotrdot, smatramo za eno od najznačilnejših karakteristik jekla v zvezi s poznavanjem kaljivosti cementirane plasti. Ta maksimum določa tisto vsebnost ogljika, pri kateri dosežemo popolno martenzito strukturo na površini cementirane plasti pri minimalni hitrosti ohlajevanja.

Nagib krivulj izotrdot je neposredno merilo za prekaljivost cementirane plasti. Kolikor je nagib manjši, tolko je večja prekaljivost. To je ugodna karakteristika jekla za direktno kaljenje. Nomogram za jeklo C.7420 in tudi za jeklo C.4720 nam potrjuje znano dejstvo, da se za direktno kaljenje uporabljajo predvsem jekla višje legirana z molibdenom.

C %	Si %	Mn %	Cr %	Ni %	Mo %	Al _{tot} %	Al _k %
0,20	0,23	0,62	0,40	—	0,40	0,009	0,006



Slika 24
Nomogram izotrdot jekla C.7420 (20 Mo Cr 4) za direktno kaljenje

Trdota, ki jo dosežemo v praksi toplotne obdelave jekel pri konstantnih pogojih avstenitizacije, je odvisna

- od hitrosti ohlajevanja,
- od vsebnosti ogljika in
- od kaljivosti jekla.

Te odnose analizira nomogram izotrdot. Znano je, da povečanje ohlajevalne hitrosti poveča trdoto jekla. Največjo trdoto doseže jeklo pri ohlajevanju s kritično ohlajevalno hitrostjo. Povečanje hitrosti ohlajevanja preko kritične meje ne omogoča nadaljnega povečevanja trdote. Poglejmo te odnose na praktičnem primeru nomograma izotrdot na sliki 21. Poglejmo najprej vpliv vsebnosti ogljika na trdoto pri ohlajevalni hitrosti, ki ustreza oddaljenosti 20 mm od kaljenega čela jominyjeve probe. S povečevanjem vsebnosti ogljika od sestave osnovnega jekla navzgor se povečuje trdota pri konstantni ohlajevalni hitrosti. To povečevanje pa lahko pričakujemo le do vsebnosti ca. 0,7 % C. Pri nadaljnjem zviševanju vsebnosti ogljika vidimo iz nomograma izotrdot, da nam začne trdota zopet razmeroma hitro padati. To je v glavnem posledica pojava zaostalega avstenita. Optimalna vsebnost ogljika je torej pri tem jeklu 0,7 do 0,8 % C. V istem nomogramu najdemo trdoto 56 HRC pri 0,4 % C samo v neposredni bližini

kaljenega čela probe. S povečevanjem vsebnosti ogljika dosežemo isto trdoto pri mnogo manjših ohlajevalnih hitrostih. Najmanjša ohlajevalna hitrost za trdoto 56 HRC je potrebna pri vsebnosti ogljika 0,7 %. Ta ohlajevalna hitrost okrog 30 °C/sek. ustreza oddaljenosti od kaljenega čela 36 mm. Pri večjih vsebnostih ogljika je zopet potrebna za doseganje iste trdote večja ohlajevalna hitrost.

Iz nomograma izotrdot dobimo torej na tak način zelo važno informacijo o optimalni vsebnosti ogljika na površini cementirane plasti, za doseganje največje trdote in kaljivosti cementiranih delov določene vrste jekla.

Pri cementaciji se največkrat predpisuje trdota površine in efektivna globina cementacije, ki jo radi definirajo s trdoto 500 HV ali 50 HRC. Gradient ogljika mora zadovoljiti te zahteve. Potrebna ohlajevalna hitrost in ustrezeni interval vsebnosti ogljika na površini se lahko določi iz nomograma izotrdot. Take informacije potrebujemo za izpolnjevanje zahtev neposredno v proizvodnji in na ta način lahko reguliramo in kontroliramo postopek cementacije.

Na osnovi rezultatov opisanih preiskav kaljivosti cementiranih jekel posameznih vrst lahko dobimo npr. odgovor na sledeča vprašanja, ki se v praksi večkrat pojavljajo in so zato zelo interesantna ter pomembna:

— Katera vsebnost ogljika ustreza maksimalni trdoti pri različnih ohlajevalnih hitrostih?

— Kateri gradient ogljika je potreben za doseganje planiranega padca trdote od površine cementiranega dela proti jedru?

— Kakšna je razlika med direktnim in indirektnim kaljenjem pri posameznih vrstah jekel?

— Katera vrsta jekla najbolj ustreza za doseganje zahtevnih gradientov ogljika in trdot?

— Kolikšna naj bo debelina naogljene plasti za doseganje zahtevane trdote npr. 50 HRC pri danem gradientu ogljika?

— Kakšen je vpliv vsebnosti legirnih elementov v jeklu na kaljivost jedra in cementirane plasti ter kolikšen je vpliv nihanja v kemijski sestavi jekla?

S podatki, ki jih dobimo le z natančnim in strokovno izvedenim preizkušanjem, torej lahko dobimo mnogo informacij, ki jih v vsakdanji toplotni obdelavi cementiranih delov nujno potrebujemo. Obvladanje lastnosti, ki jih s to metodo preizkušamo, nam omogoča uravnavanje tehnološkega postopka v proizvodnji, planiranje kvalitete in določitev najučinkovitejše kontrole.

Literatura:

1. Rodič A.: Obrobna kaljivost cementacijskih jekel, *Železarski zbornik* 1967/1, str. 64—79, Kranj.
2. Termička obrada čelika, pogl. 11.3, Metalbiri, Zagreb 1969.
3. Vodopivec F., M. Stupnišek: Obrobna kaljivost jekel za cementacijo, Poročila Metalurškega inštituta Ljubljana, 1963, naloga 310—11.
4. Vodopivec F., L. Kosce: Obrobna kaljivost jekel za cementacijo, Poročila Metalurškega inštituta Ljubljana, 1965, naloga 365/1 (Železarna Ravne).
5. Interna dokumentacija naloga SOR-6912 — Železarna Ravne.
6. Meyer, »Die Randhärtebarkeit als Kriterium der Einsatzstähle«, *Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, Jg. 105, H 11, 1960, str. 292—301.
7. Tipizirani čelik DK — izdaja Metalbiri — Zagreb.
8. Schaaber O.: Zum Problem der Wärmebehandelbarkeit, *Härterei — Technische Mitteilungen*, Bd. 21/1956/H 2, str. 102—110.

ZUSAMMENFASSUNG

Dieser Artikel ist eine Zusammenfassung aller bisherigen Untersuchungen der Randhärtebarkeit im Hüttenwerk Ravne, mit Beachtung auch dieser Aufgaben welche auf diesem Gebiet im Auftrag des Hüttenwerkes Ravne der Eisenhütteninstitut in Ljubljana gefertigt hat.

Im Artikel sind auf Grund der bisherigen Festlegungen Vorschläge für die Typisierung der Prüfungsbedingungen gegeben. Das würde die gegenseitige Vergleichung ermö-

glichen. Die Prüfung wäre dadurch reproduzierbar und in viel weitem Umfang anwendbar.

Es sind einige Untersuchungsvarianten für die Forschungs- und Kontrolluntersuchungen für das direkte und indirekte Härten angegeben.

Mit den Jominykurven und Nomogrammen der Isohärte sind charakteristische Eigenschaften der typischen Einsatzstähle aus dem Produktionsprogramm des Hüttenwerkes Ravne dargestellt.

SUMMARY

The paper represents summary of all investigations on case hardening made in Ravne ironworks till now, taking in account also projects made by Metallurgical Institute in Ljubljana which were ordered by Ravne ironworks.

Based on the findings obtained till now the proposition for standardisation of testing conditions for case

hardening is given which would enable comparisons, reproducibility of tests, and their wider use.

Testing variations for research and control investigations of direct and indirect hardening are given.

Characteristic properties of standard steel types for carburisation from the Ravne ironworks production program are shown by Jominy curves and nomograms of isohardnesses.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статья представляет обзор исследований поверхностной закалки выполненных в металлургическом заводе Равне (Železarna Ravne, Ravne), при чём приняты во внимание также работы которые разработал по заказу комбината Равне Металлургический Институт в Любляне. В статье подано предложение о типизации условий поверхностной закалки что позволит взаимное сравнение

процесса а также даст исследованию ценность что касается возможности репродукции и более широкого применения.

Поданы варианты испытания необходимы для изучения и для контрольного исследования прямой и косвенной закалки. При помощи кривых Jominy и номограмм изотвёрдости изнесены характерные качества типических сортов стали для цементации из программы производства металл. комбината Равне.