

Žarjenje jekla Č. 4320 na feritno-perlitno strukturo za boljšo obdelavo

Avtomatizacija mehanske obdelave zahteva dobavo materiala z dobro obdelovalnostjo. Na osnovi podatkov iz strokovne literature je narejena raziskava toplotne obdelave jekla Č. 4320 (EC-80) na 10 talinah. Članek obravnava zaključke iz strokovne literature ter potek in rezultate lastnih raziskav toplotne obdelave jekla Č. 4320 na feritno-perlitno strukturo, kakršno predpisujejo nemške norme DIN 17210 za jeklo 16 MnCr 5. Obravnavani so pogoji toplotne obdelave (temperatura, čas, način ohlajanja) za ugoditev zahtevam: velikost zrna, vrsta strukture, trdota in trakava struktura. Preizkušena je tudi toplotna obdelava za popravo materiala, ki je bil toplotno obdelan pri pogojih, ki dajo grobo zrno.

UVOD

V predelavi in obdelavi kovin se stremi po čim večji avtomatizaciji. Pri taki avtomatizirani proizvodnji pa je zelo važna obdelovalnost. V splošnem je obdelovalnost večja pri materialu, ki ima grobo zrno. Čimbolj je razvita končna mehanska obdelava, tem večja je nevarnost, da ni možno združiti zahteve za posamezne faze pri izdelovalnem postopku. Tako se primeri, da se pri toplotni obdelavi želi drobno zrno, zato se stremi po čim krajših časih avstenitizacije. Nasprotno pa se pri mehanski obdelavi daje prednost grobem zrnu, ker poveča vzdržljivost obdelovalnemu orodju.

TTT-diagrami nam omogočajo pregled mehanskih lastnosti in struktur, ki so neposredno odvisne od hitrosti ohlajanja.

Vsa podvektoidna jekla imajo naslednje možnosti toplotne obdelave za boljšo obdelovalnost¹:

1. izotermno žarjenje,
2. popolno žarjenje s tvorbo grobega lamelarnega perlita, ki se brez vmesnega ohlajanja na temperaturo okolice sferoidizira pri temperaturi pod A_1 ,
3. poboljšanje s končnim ustrezno podaljšanim popuščanjem tik pod A_1 .

Nemški predpisi² (DIN 17210) predpisujejo za cementacijska jekla tri vrste toplotne obdelave za boljšo obdelovalnost²:

1. mehko žarjenje z dopustno maksimalno trdoto,
2. toplotno obdelavo na določeno trdnost s predpisanim nekaj višjim območjem trdote,

3. toplotno obdelavo na določeno strukturo oziroma na feritno-perlitno strukturo s predpisanim precej nizkim območjem trdote.

Pogosto se te predpise poenostavljeno izpolnjuje, tako da se dosega grobo feritno-perlitno zrno (sekundarno zrno 1 do 4 po ASTM — Norm E 89-52)². Prednost grobe strukture je v tem, da z grobim sekundarnim zrnem prekrijemo slab vpliv primarne trakavosti².

Grobo zrno pri jeklu Č.4320 (EC-80) z grobim avstenitnim oz. primarnim zrnem (po Mc Quaid — Ehn ASTM), t. j. pri tako imenovanih grobozrnatih jeklih s skupnim Al pod 0,015 %, se doseže po vročem valjanju ali kovanju s toplotno obdelavo že z relativno nižjo temperaturo avstenitizacije (900 do 1000° C) in izotermno premeno v spodnjem delu perlitnega območja².

Bistveno težje pa je doseči grobo zrno pri tako imenovanem drobnozrnatem jeklu EC-80 s skupnim Al nad 0,020 % (Mc Quaid — Ehn 5 — 8 po ASTM), ki se uporablja za direktno kaljenje po plinski cementaciji. Da se pri teh jeklih doseže grobo sekundarno zrno, je neizogibno precej povišati temperaturo avstenitizacije, kar pa prinese nove težave².

Obdelovalnost ne zavisi samo od strukture, ampak v mnogih primerih tudi od natezne trdnosti, nemetalnih vključkov in drugega¹. Kot že omenjeno je za obdelavo najugodnejša groba struktura, ta pa je bolje označena z deležem ferita, velikostjo avstenitnega zrna in natezno trdnostjo. Pri osvojenem postopku žarjenja zavisi delež ferita neposredno od velikosti avstenitnega zrna, a natezna trdnost je odvisna od deleža ferita. Tako lahko pri znani velikosti avstenitnega zrna predpišemo žarilni postopek s primerno hitrostjo ohlajanja za določeno natezno trdnost ali za določeno vsebnost ferita¹.

Zaradi takih predpisov pa se je izoblikoval postopek žarjenja za dosego tako imenovane »črno-bele strukture«, ki sestoji iz ferita in vmesnostopenjske strukture, kupec pa pri tem zahteva grobo zrno¹.

Kunze in Brandis¹ sta pri jeklu s sestavo 0,18 % C, 0,31 % Cr, 0,28 % Mo in 2 % Ni z večjo hitrostjo ohlajanja dosegla finejše zrno. Kljub počasnemu ohlajanju v območju tvorbe ferita pa se pri tem postopku dobi ostanek martenzita, kar poslabša vzdržnost orodja. Določeno hitrost ohlajanja pa je v obratu težko vzdrževati. Za dosego

feritno-perlitne strukture pa je potrebno počasno ohlajanje samo v območju 750 in 650° C, kar velja tudi za jeklo 16 Mn Cr 5, pozneje se lahko ohlaja poljubno¹. S tem so izpolnjene vse zahteve po dobri obdelovalnosti.

Ista avtorja¹ sta pri jeklu 16 Mn Cr 5 naredila med drugim tudi primerjavo med dvema postopkoma žarjenja za doseg feritno-perlitne strukture: med izotermnim in počasnim ohlajanjem. Z izotermnim žarjenjem se doseže enakomernejša struktura in odpravi trakavost; postopek je mnogo krajši od počasnega ohlajanja.

Cim višja je vsebnost Ni v Cr-Mo jeklih, tem težje je ta jekla žariti na določeno strukturo. To delno zaradi lenosti, delno zaradi nižje lege premenske točke A₁.

Knorr in drugi² so se temeljito posvetili žarjenju jekla 16 Mn Cr 5. Preiskali so nekaj grobozrnatih in nekaj drobozrnatih talin; avstenitizacijske temperature 920 do 1200° C in izotermne premene pri temperaturah 600 in 650° C. Pri 600° C so trdote nekoliko višje. Rezultati so pokazali, da drobozrnatim jeklom zrno bistveno zraste šele pri temperaturah nad 1000° C, a pri temperaturah med 1100 in 1200° C imata obe skupini jekel enako grobo zrno, drobo zrnata jekla dosežejo celo bolj grobo zrno. Sekundarno zrno je nekoliko finejše od primarnega avstenitnega zrna. Morebitno podaljšanje časa avstenitizacije nad 1 uro bistveno ne poveča zrna. Pri podaljšanju za 10 ur šele zrno naraste za eno enoto². Najprimernejša temperatura izotermne premene za jeklo 16 Mn Cr 5 je 630° C⁴.

Z zelo počasnim ohlajanjem (0,5° C/min) se doseže enako veliko zrno kot pri običajnem izotermnem postopku².

Zahtevano strukturo in trdoto je možno doseči že takoj po kovanju oz. valjanju s primernim ohlajanjem. Vsekakor se praktično doseže nekoliko bolj grobo zrno² z uporabo končne temperature kovanja in ohlajanja 12° C/min pri jeklu 16 Mn Cr 5, čeprav so raziskave pokazale prav nasprotno².

RAZISKAVE

V laboratorijskih električnih komornih oz. jaškastih pečeh z mešanjem atmosfere je bila narejena serija poskusov, ki naj bi pokazala odvisnosti velikosti primarnega in sekundarnega zrna, strukture, trakavosti in trdote od temperature in časa avstenitizacije ter od načina ohlajanja za domačo vrsto jekla Č.4320 (EC-80), ki ustreza jeklu 16 Mn Cr 5.

Preizkušanih je bilo 10 različnih talin, katerih kemijska sestava je navedena v tabeli 1. V tej tabeli je navedena tudi velikost avstenitnega zrna, ki je bilo določeno po Mc Quaid-Ehnu. Po tej velikosti zrn in po velikosti primarnega zrna pri temperaturah avstenitizacije 900 in 950° C so vse taline razvrščene v tri skupine:

- drobozrnate taline 2, 4, 5 in 6,
- grobozrnate taline 1, 9 in 10 in
- mešanozrnate oz. srednjezrnate taline 3, 7 in 8.

Tabela 1 — Kemijske sestave in velikost avstenitnega zrna

Talina	Kemijska sestava v %									Mc Q.-E. 925° C po ASTM
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ceq		
1	0,16	0,18	1,01	0,025	0,022	0,93		0,530	3	
2	0,17	0,24	1,00	0,015	0,018	0,89		0,540	7	
3	0,18	0,23	1,15	0,017	0,022	0,98	0,15	0,601	3 — 4	
4	0,15	0,17	1,23	0,017	0,021	1,00	0,20	0,580	6	
5	0,19	0,31	1,05	0,026	0,029	1,02	0,22	0,617	5 — 6	
6	0,17	0,26	1,00	0,016	0,027	0,96	0,16	0,562	6	
7	0,16	0,17	1,17	0,015	0,015	0,97	0,21	0,570	6	
8	0,16	0,29	1,17	0,015	0,020	0,97	0,14	0,594	4	
9	0,16	0,17	1,09	0,027	0,026	0,98	0,17	0,557	2 — 3	
10	0,16	0,22	1,20	0,017	0,021	0,96	0,18	0,584	4	

V tabeli 1 je izračunan tudi ogljikov ekvivalent (C eq) po obrazcu: $Ceq = C + \frac{1}{5} Mn + \frac{1}{4} Cr + \frac{1}{5} (Si - 0,5)$.

Po tem ekvivalentu so vse taline razvrščene v dve skupini:

- trde taline 3, 4, 5, 8 in 10 in
- mehke taline 1, 2, 6, 7 in 9.

Vsem talinam so določene tudi dilatometrijske premenske točke pri ogrevanju in ohlajanju 3° C/minuto, katerih srednje vrednosti so:

- pri ogrevanju
temperatura začetka pri 725 (od 725 do 730) °C in konca premene pri 825 (od 815 do 845) °C,
- pri ohlajanju
temperatura začetka pri 751 (od 730 do

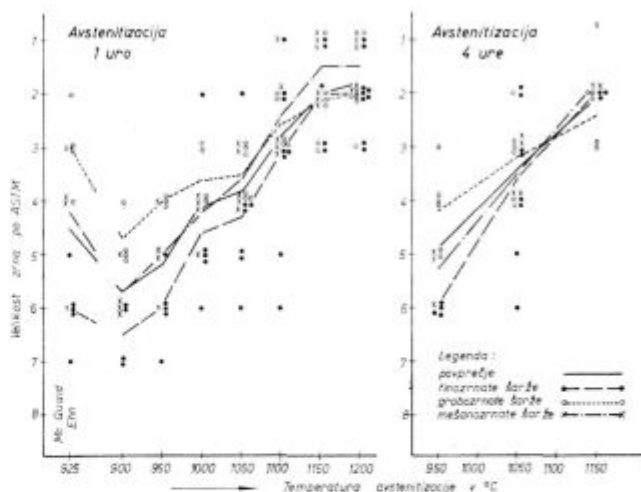
770) °C in konca premene pri 625 (od 605 do 650) °C.

Liti ingoti 450 kg kvadratnega prereza s srednjo stranico 222 mm so bili valjani v gredice kvadrat 90 mm, te pa kovane na okrogle palice z debelino 20 mm. S palicami te debeline so narejeni naslednji poizkusi:

- Počasno ohlajanje v električni komorni peči:
 - avstenitizacija 1 oz. 4 ure pri temperaturi 900, 950, 1000, 1050, 1100, 1150 in 1200° C,
 - ohlajanje v peči (približno 30 do 100 minut) do 750° C, nato 20° C/h do 650° C in nadalje v peči (približno 90 minut) do 550° C, nato na zraku.
- Izotermno ohlajanje:
 - avstenitizacija 1 uro pri istih temperaturah v električni komorni peči,
 - prenos v jaškasto električno peč z mešanjem atmosfere na temperaturi 630° C,
 - izotermno držanje na 630° C:
 - pri avstenitizacijski temperaturi 900 do 1100° C 1 uro,
 - pri avstenitizacijski temperaturi 1150° C ... 2 uri,
 - pri avstenitizacijski temperaturi 1200° C ... 4 ure,
 - nadaljnje ohlajanje na zraku.
- Avstenitizacija 1 uro pri istih temperaturah 900, 950, 1000, 1050, 1100, 1150 in 1200° C ter 4 ure pri temperaturah 950, 1050 in 1150° C, ohlajanje direktno v vodi.
- Normalizacija 20 minut na temperaturi 900° C, ohlajanje na zraku.
- Mehko žarjenje 2 uri na temperaturi 680° C, nato ohlajanje s pečjo do 550° C in naprej na zraku,
- Vzorci, toplotno obdelani po točki 3 pri temperaturah 1100 in 1200° C so dodatno avstenitizirani 1 uro na temperaturi 900° C in ohlajeni direktno v vodi.
- Vzorci, toplotno obdelani po točkah 1 in 2 eno uro na temperaturah 1100 in 1200° C so dodatno avstenitizirani eno uro na temperaturi 900 oz. 920° C in ohlajeni na zraku.
- Vzorci, mehko žarjeni po točki 5, so dodatno avstenitizirani eno uro na temperaturi 920° C in ohlajeni na zraku.

Na toplotno obdelanih palicah so določene trdote po Brinellu na površini, metalografsko določena velikost zrna po ASTM in metalografsko ocenjena trakavost po tabeli na sliki 10. Ta tabela za ocenjevanje trakavosti je pripravljena posebej za drobno sekundarno zrno (slika 10 a) in posebej za grobo sekundarno zrno (slika 10 b).

Z ohlajanjem direktno v vodi po avstenitizaciji je fiksirana velikost avstenitnega (primarnega) zrna, ki je določeno metalografsko na prečnem obrusu. Na sliki 1 je diagramski prikaz odvisnosti velikosti primarnega zrna od temperature avsteni-

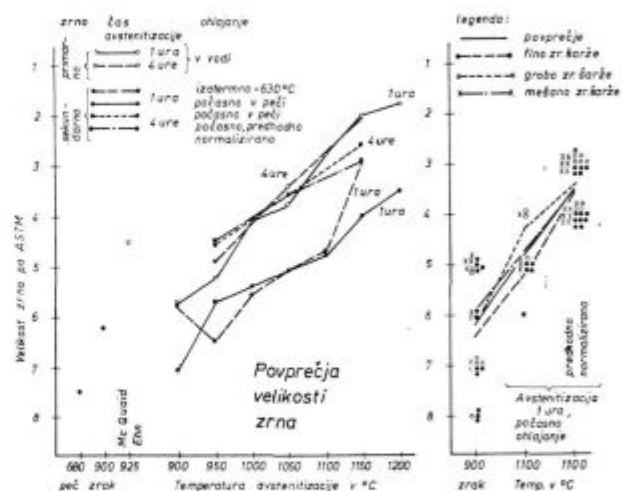


Slika 1

Velikost primarnega zrna, 10 talin jekla Č.4320, vzorci Ø 20 mm, ohlajani v vodi

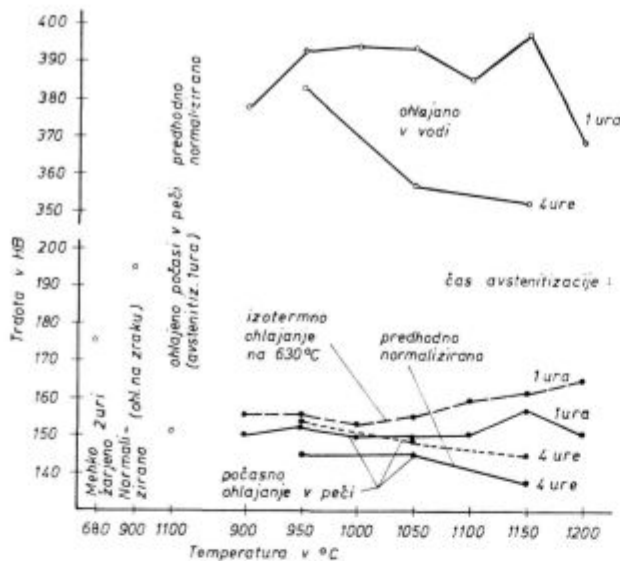
tizacije za čas avstenitizacije 1 in 4 ure. Za primerjavo so med seboj ločeni rezultati za drobno, grobo in mešano zrnate taline in dodani rezultati ocenjevanja velikosti avstenitnega zrna po McQuaid-Ehnu. Na diagramih je očitno različno obnašanje drobno in grobo zrnatih talin: do temperature 1050 ali celo do 1100° C se te po velikosti sekundarnega zrna močno razlikujejo, ta razlika pa pri temperaturi avstenitizacije nad 1100° C popolnoma izgine ali celo obratno, da drobno zrnate taline dajo bolj grobo sekundarno zrno. To zadnje se popolnoma ujema s podatki literature^{2,8}. Povprečna velikost primarnega zrna naraste od 5—6 po ASTM (pri 900° C) na 1—2 po ASTM (pri 1200° C), ki pa se s podaljšanjem avstenitizacije od 1 ure na 4 ure ne poveča (glej tudi primerjalni diagram na sliki 2).

V vodi ohlajanim palicam je določena tudi trdota. Primerjava te je diagramsko prikazana na sliki 3.



Slika 2

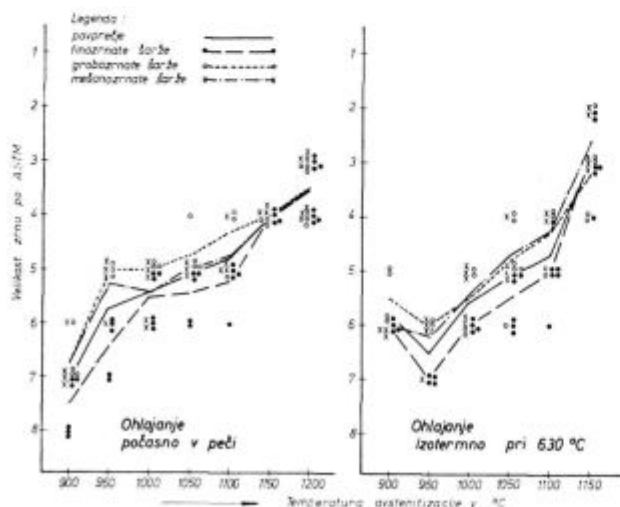
Primerjava velikosti zrna, 10 talin jekla Č.4320, vzorci Ø 20 mm



Slika 3

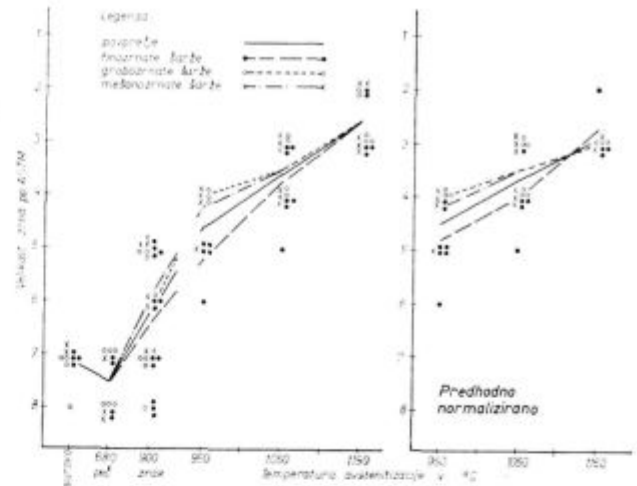
Povprečna trdota, 10 talin jekla C.4320 v odvisnosti od toplotne obdelave, vzorci Ø 20 mm

Za ostale postopke toplotne obdelave je na preizkusnih palicah poleg površinske trdote v Brinellu določena še velikost sekundarnega zrna po ASTM, ocenjevana trakavost in določena vrsta strukture na vzdolžnem obrusu. Velikost sekundarnega zrna v odvisnosti od temperature in vrste toplotne obdelave je diagramsko prikazana na slikah 4, 5 in 2. Na sliki 2 je prikazana primerjava velikosti zrna med vsemi izvedenimi postopki toplotne obdelave. Velikost zrna vzporedno narašča s temperaturo. Sekundarno zrno naraste pri enourni avstenitizaciji od 6—7 po ASTM (pri 900°C) na 3—4 po ASTM (pri 1200°C). S podaljšanjem časa avstenitizacije od 1 ure na 4 ure se sekundarno zrno poveča za približno eno enoto po ASTM. Pri enourni avstenitizaciji pri 1100°C s počasnim ohlajanjem se sekundarno zrno poveča približno



Slika 4

Velikost sekundarnega zrna, 10 talin jekla C.4320, vzorci Ø 20 mm, čas avstenitizacije 1 ura



Slika 5

Velikost sekundarnega zrna, 10 talin jekla C.4320, vzorci Ø 20 mm, ohlajani počasno v peči, čas avstenitizacije 4 ure. Za primerjavo so podatki za jeklo v surovem, mehko žarjenem in normaliziranem stanju

za eno enoto po ASTM, če se palice predhodno normalizira. Nasprotno pa pri štiriurni avstenitizaciji s predhodno normalizacijo ni opaziti bistvenega povečanja zrna.

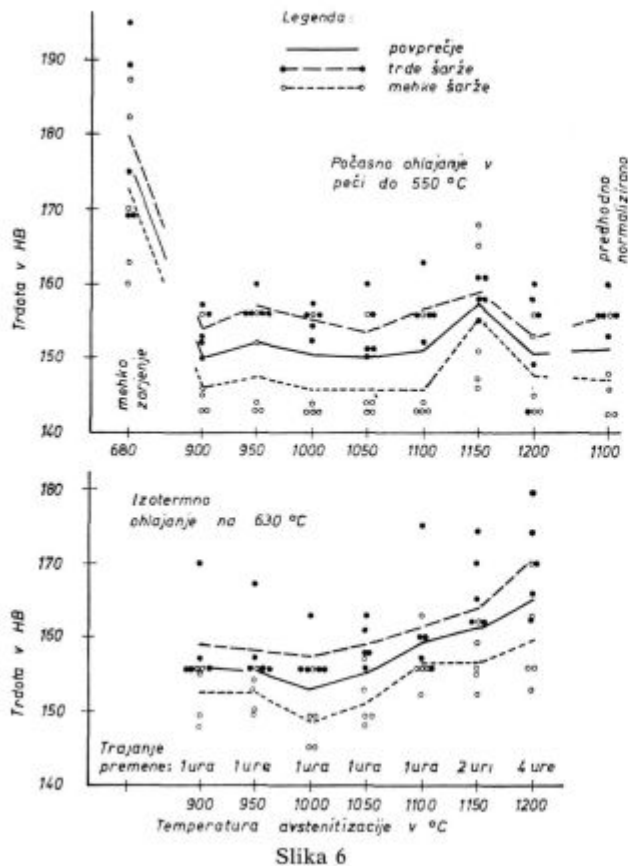
Grobo primarno in sekundarno zrno se pri drobozrnatih talinah popolnoma popravi s pravilno končno toplotno obdelavo. Tako je pri grobozrnatih palicah vseh talin (primarno zrno 1 do 3 po ASTM) s kaljenjem iz 900°C v vodi po postopku 6 doseženo normalno drobno zrno (primarno zrno 5 do 6 po ASTM), ki popolnoma ustreza velikosti zrna, doseženi po postopku 3 s kaljenjem prav tako iz 900°C. Podobno je pri grobozrnatih palicah (sekundarno zrno 3 do 5 po ASTM) z normalizacijo iz 900°C po postopku 7 dosežemo normalno drobno zrno (sekundarno zrno 5 do 7 po ASTM) ki popolnoma ustreza velikosti zrna, doseženi po postopku 4 z normalizacijo prav tako iz 900°C.

Za preizkušene in predpisane načine toplotne obdelave so predpisane naslednje trdote za jeklo C. 4320 (EC-80) (16 Mn Cr 5):

1. Mehko žarjeno maksimalno 207 HB 30 (po JUS C.B9.020 in DIN 17210).
2. Toplotno obdelano na določeno trdnost 156 do 207 HB 30 (po DIN 17210).
3. Toplotno obdelano na feritno-perlitno strukturo 140 do 187 HB 30 (po DIN 17210).

Pri navedenih raziskavah z 10 talinami tega jekla so dosežena naslednja območja trdot:

1. Mehko žarjeno povprečno 176 HB (160 do 195 HB), (slika 6).
2. Normalizirano povprečno 183 HB (156 do 224 HB), (slika 7).
3. Žarjeno z eno in štiriurno avstenitizacijo pri temperaturi 900 do 1200°C in počasnim in izotermnim ohlajanjem ima trdoto od 131 do 179 HB, (glej sliki 6 in 7).



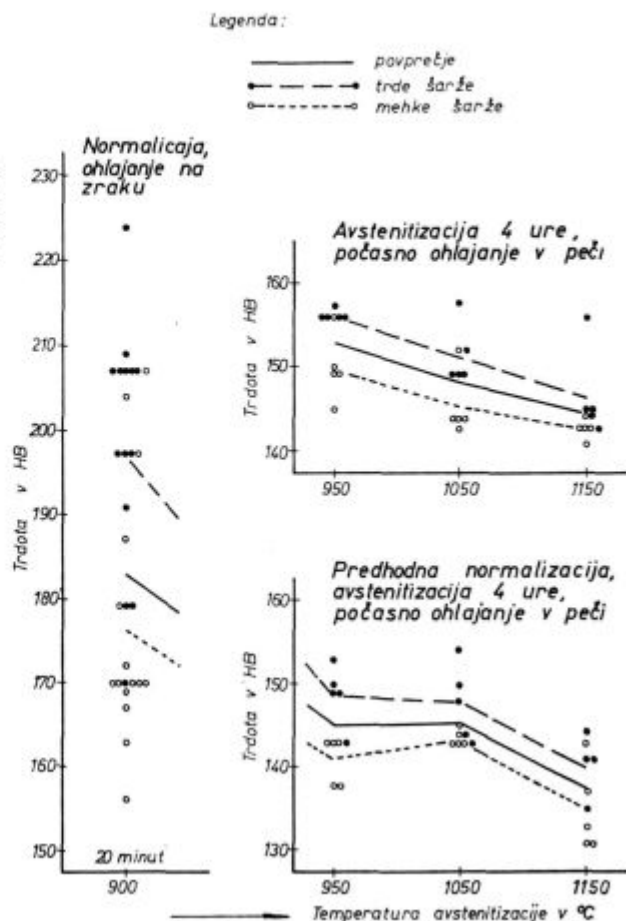
Slika 6
Trdota žarjenih vzorcev \varnothing 20 mm, 10 talin jekla Č.4320, čas avstenitizacije 1 ura

Na sliki 6 in 7 se vidi, da pri enourni avstenitizaciji in počasnem ohlajanju trdota ni odvisna od temperature, pri izotermnem ohlajanju trdota nekoliko narašča s temperaturo, pri štiriurni avstenitizaciji in počasnem ohlajanju pa trdota nekoliko pada s temperaturo. Tako imenovane trde taline imajo pri vseh postopkih toplotne obdelave res višjo trdoto, kar je odvisno od sestave, t. j. od ogljikovega ekvivalenta, od vsebnosti ogljika, kroma in bakra, nekoliko manj od vsebnosti mangana.

Povprečno so trdote nekoliko višje pri izotermnem ohlajanju in nekoliko nižje pri daljši avstenitizaciji in še nižje pri predhodno normaliziranih palicah. Ta primerjava v odvisnosti od tempera-

Tabela 2

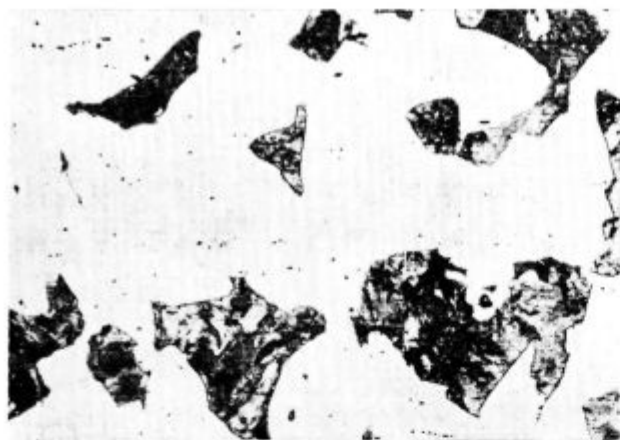
Postopek ohlajanja	Talina	Trdota HB-30 kp/mm ²	meja plastičnosti σ_s kp/mm ²	natezna trdnost $\sigma_{0.2}$ kp/mm ²	raztezek δ_5 %	kontraktacija ψ %	$\sigma_{0.2}$ HB
Počasno ohl. v peči	2	144,0	31,9	51,8	28,2	62,4	0,360
	5	158,8	33,4	56,1	26,4	61,1	0,353
Izotermno ohlajeno pri 630° C	2	151,7	33,7	54,1	28,0	68,6	0,356
	5	170,1	37,1	59,5	26,5	66,3	0,350



Slika 7
Trdota normaliziranih in žarjenih vzorcev \varnothing 20 mm, 10 talin jekla Č.4320

ture je prikazana na sliki 3, kjer so naznačena povprečja doseženih trdot tudi za ostale postopke.

Za palice taline 2 in 5, ki so bile po enourni avstenitizaciji pri 900 do 1200° C počasno in izotermno ohlajene ter mehko žarjene, je bil izveden tudi raztržni preizkus. Povprečne vrednosti rezultatov za vse avstenitizacijske temperature so podane v tabeli 2. Izračunan je tudi kvocient med natezno trdnostjo in trdoto po Brinellu. Pri 30 trgalnih palicah se ta giblje v območju od 0,32 do 0,37 oziroma povprečno 0,355.



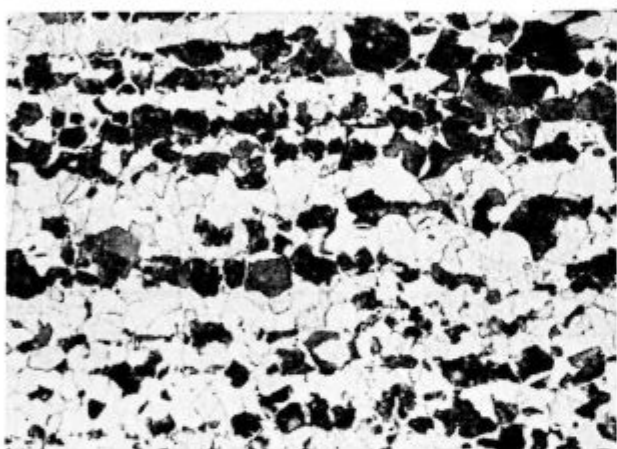
Slika 8 a

Talina 4, 1200° C, velikost sekundarnega zrna 3 — 4 ASTM, trakovost 3



Slika 8 d

Talina 10, 1200° C, velikost sekundarnega zrna 3 — 4 ASTM, trakovost 2



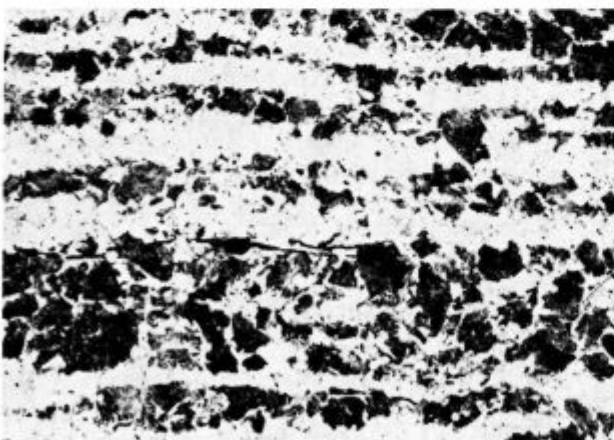
Slika 8 b

Talina 4, 1050° C, velikost sekundarnega zrna 6 ASTM, trakovost 4



Slika 8 e

Talina 10, 1050° C, velikost sekundarnega zrna 4 — 5 ASTM, trakovost 4



Slika 8 c

Talina 4, 900° C, velikost sekundarnega zrna 7 — 8 ASTM, trakovost 4



Slika 8 f

Talina 10, 900° C, velikost sekundarnega zrna 7 ASTM, trakovost 4

Slika 8

Primerjava struktur drobnozrnate taline 4 in grobnozrnate taline 10 jekla C.4320, žarjenih 1 uro pri 900 do 1200° C in počasno ohlajanih v pečl do 550° C; povečava 200-krat



Slika 9 a
Talina 4, 1200° C, trakavost 1



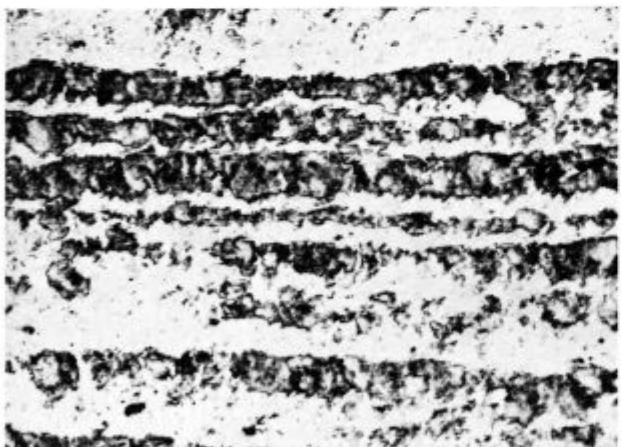
Slika 9 d
Talina 10, 1200° C, trakavost 1



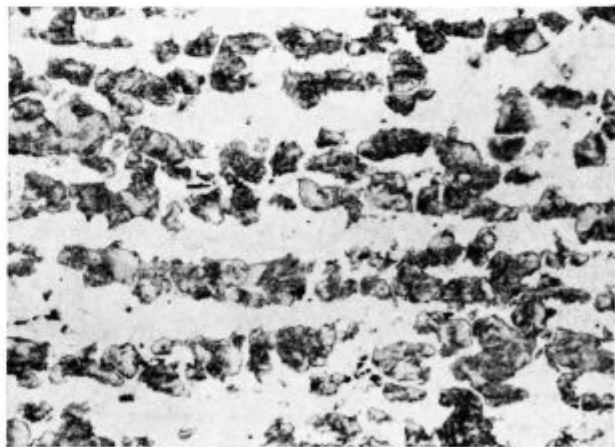
Slika 9 b
Talina 4, 1050° C, velikost sekundarnega zrna 6 ASTM, trakavost 4



Slika 9 e
Talina 10, 1050° C, velikost sekundarnega zrna 4 — 5 ASTM, trakavost 2



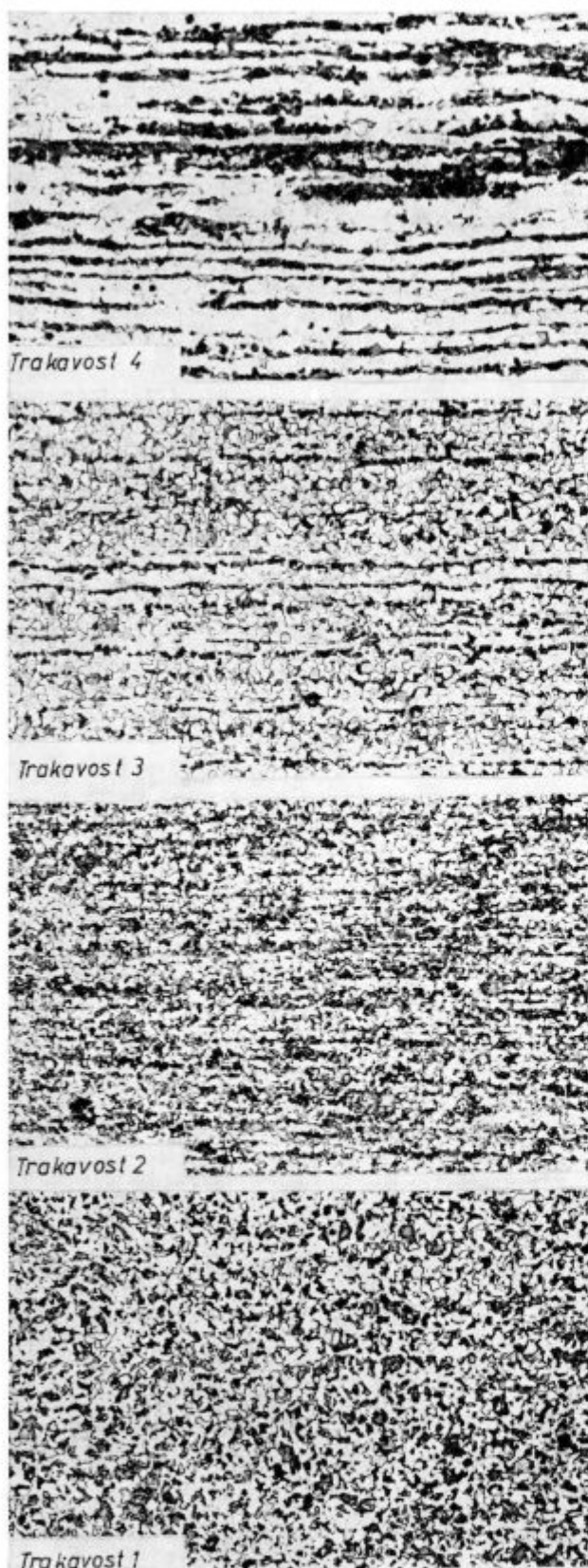
Slika 9 c
Talina 4, 900° C, velikost sekundarnega zrna 6 ASTM, trakavost 4



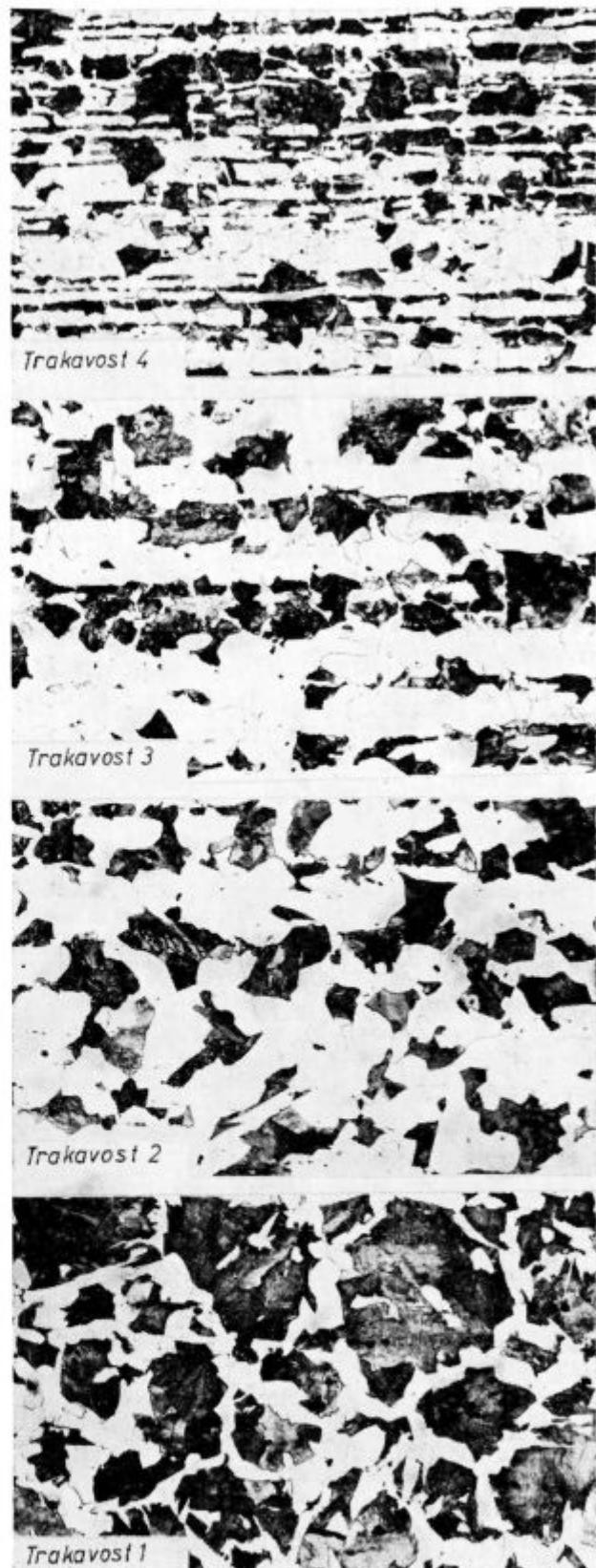
Slika 9 f
Talina 10, 900° C, velikost sekundarnega zrna 6 ASTM, trakavost 4

Slika 9

Primerjava struktur talin 4 in 10 jekla C.4320, žarjenih 1 uro pri 900 do 1200° C in ohlajanih izotermno pri 630° C; povečava 200-krat



Slika 10 a
Drobno sekundarno zrno 7 — 8 po ASTM



Slika 10 b
Grobno sekundarno zrno 2 — 4 po ASTM

Slika 10

Tabela za metalografsko ocenjevanje trakavosti jekla C.4320 (EC 80), žarjenega pri temperaturi 900 do 1200° C; povečava 100-krat

Struktura palic je pri vseh postopkih sestavljena iz feritnih in perlitnih zrn (pri avstenitizaciji na 1200° C in izotermnem ohlajanju je feritna mreža), razen pri normalizaciji, kjer je večji delež vmesnostopenjske strukture, in pri mehkem žarjenju, kjer je manjši delež vmesnostopenjske strukture.

Na slikah 8 in 9 je prikazana primerjava dobljenih struktur pri enourni avstenitizaciji na temperaturi 900, 1050 in 1200° C pri obeh načinih ohlajanja za talino 4 in 10. Slika 8 prikazuje strukture talin 4 in 10, ki so bile po avstenitizaciji počasno ohlajane v peči; slika 9 pa strukture istih talin, ki so bile po avstenitizaciji ohlajane izotermno pri 630° C. Talina 4 se obnaša kot povprečno drobnozrnata, a talina 10 kot povprečno grobozrnata jekla. Pri drobnozrnati talini 4 je primarno in sekundarno zrno še pri 1050° C drobno, medtem ko pri grobozrnati talini 10 primarno in sekundarno zrno postane zelo grobo že pri 1050° C ali celo pri nižji temperaturi avstenitizacije.

Trakavost v žarjenih palicah je ocenjevana metalografsko po tabeli na sliki 10, kjer pomeni za posamezno oceno:

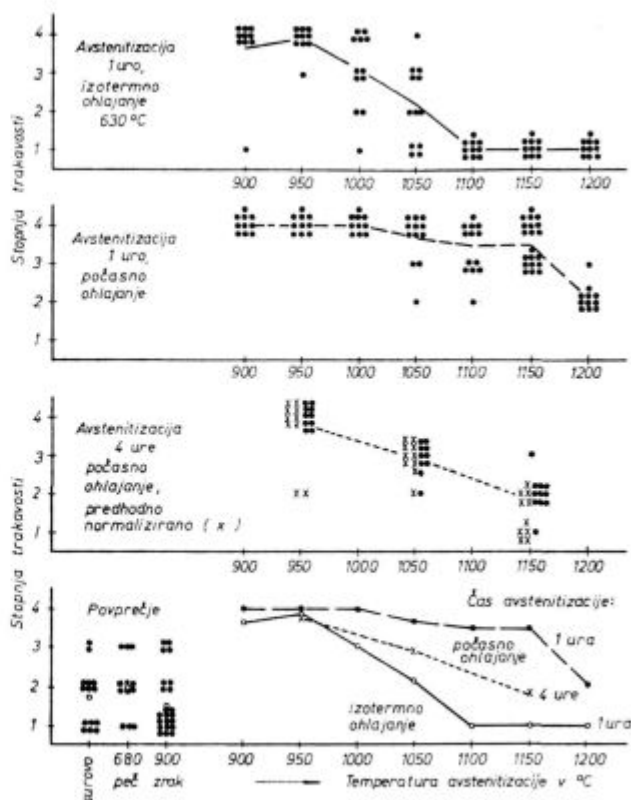
- 4 — močna trakasta struktura preko celega preseka,
- 3 — močni ostanki trakaste strukture,
- 2 — rahli ostanki trakaste strukture,
- 1 — ni opaziti trakaste strukture.

Rezultati ocenjevanja trakavosti so prikazani v obliki diagramov na sliki 11: v gornjih treh diagramih je vidno trosenje rezultatov pri posameznih postopkih, v spodnjem pa je primerjava trakavosti med postopki v odvisnosti od temperature avstenitizacije. Pri enourni avstenitizaciji je s počasnim ohlajanjem trakavost znižana na znosno mero šele pri najvišji temperaturi, podaljšanje avstenitizacije stanje nekoliko izboljša, medtem ko je pri izotermnem ohlajanju trakavost popolnoma odpravljena že pri nižjih temperaturah avstenitizacije 1100° C.

Predhodno normalizirane palice niso bile po žarjenju in počasnem ohlajanju nič manj trakave od nenormaliziranih.

S hitrejšim ohlajanjem po avstenitizaciji do kritičnega temperaturnega območja, t. j. do pod A_{r3} , se z večjo sigurnostjo odpravi trakavost. Tako so na zraku normalizirane palice pretežno brez trakavosti, medtem ko so na isti temperaturi avstenitizirane in v drugo peč na 630° C prenesene palice še močno trakaste. To je tudi možno primerjati na sliki 11.

Tudi na slikah 8 in 9 je vidna razlika v trakavosti. Tu je vidno, da je trakavost pri žarjenju najprej odstranjena pri talini 10 z izotermnim ohlajanjem po avstenitizaciji (slika 9).



Slika 11
Trakava struktura žarjenih vzorcev $\varnothing 20$ mm, 10 talin jekla C.4320

Trakavost se odstrani:

- z višjo temperaturo in daljšim časom avstenitizacije, s čimer se omogoči večjo difuzijo elementov in izravnavo kemijske sestave in
- s čim hitrejšim ohlajanjem od temperature avstenitizacije do temperaturnega območja premene, s čimer se prepreči ali omeji povratno difuzijo, oziroma izcejanje posameznih elementov, posebno ogljika.

S pravilno končno toplotno obdelavo mehansko obdelanega in naogljčenega jekla se trakavost popolnoma odpravi. Tako nikakor ni upravičena bojazen, da bi morebitna trakava žarjena struktura ostala trakava tudi po končnem kaljenju.

Pri pravilni končni toplotni obdelavi grobožarjenega jekla se dosega popolnoma zadovoljivo žilavost. Taka primerjava žilavosti je izvedena na 6 omenjenih talinah (talina 1, 4, 6, 7, 9 in 10). Določena je udarna žilavost popolno žarjenim palicam (1200° C — 1 ura) in mehkožarjenim palicam. Po dodatni normalizaciji po postopku 7 in 8 (920° C — 1 ura) je palicam ponovno določena udarna žilavost. Primerjavo teh preiskav kaže naslednja tabela 3.

Mehko žarjene palice imajo precej višjo žilavost (kar je slabo za obdelovalnost) kot popolno žarjene palice. Z dodatno normalizacijo pa je pri

Tabela 3

Prvotna toplotna obdelava	Z dodatno normalizacijo			
	Žilavost kpm/cm ²	920° — 1 h/zrak žilavost	—	dosežena kpm/cm ²
1200° C - 1 ura ohlajanje počasi	5,7 — 12,3	5,0	—	15,7
1200° C - 1 ura ohl. izotermno 630°	7,7 — 15,4	4,0	—	19,0
680° C - 2 uri ohlajanje počasi	16,8 — 22,0	5,0	—	8,5

mehko žarjenih palicah dosežena precej slabša žilavost (5,0—8,5 kpm/cm²) kot pri popolnožarjenih (4,0—19,0 kpm/cm²). Nekaterim popolnožarjenim palicam z dodatno normalizacijo žilavost celo naraste.

ZAKLJUČEK

Pri vseh izvedenih postopkih žarjenja jekla C 4320 (EC-80) na feritno-perlitno strukturo je zahtevana struktura tudi dosežena. Ostale zahteve (velikost zrna, trakavost in trdota) pa so odvisne od temperature in trajanja avstenitizacije, načina oziroma hitrosti ohlajanja in kemijske sestave taline.

S kovanimi okroglimi palicami debeline 20 mm iz 10 talin sta preiskovana dva načina toplotne obdelave za dosego feritno-perlitne strukture:

- Eno in štiriurna avstenitizacija na temperaturah v območju 900 in 1200° C s počasnim ohlajanjem v peči do 550° C, nato na zraku.
- Enourna avstenitizacija na istih temperaturah, a z izotermnim ohlajanjem na temperaturi 630° C, nato na zraku.

Vsi rezultati so primerjani z normalizacijo in mehkim žarjenjem.

1. Sekundarno zrno naraste pri enourni avstenitizaciji ne glede na hitrost ohlajanja od 6—7 po ASTM pri 900° C na 3—4 po ASTM pri 1200° C. S podaljšanjem avstenitizacije od 1 na 4 ure se sekundarno zrno približa velikosti primarnega zrna, ki je vzporedno večje za eno do dve stopnji po ASTM.

Velikost avstenitnega zrna, določena po Mc Quaid-Ehnu, se med talinami bolj razlikuje kot velikost primarnega zrna, določena s kaljenjem v vodi iz avstenitizacijskih temperatur 900 in 950° C

(1 in 4 ure) in ocenjevana po ASTM. Tudi povprečna velikost zrna je za približno eno stopnjo bolj groba.

Pri drobozrnatih talinah primarno in sekundarno zrno ostane drobno do precej visokih temperatur avstenitizacije (1050° C) in pri višjih temperaturah skokoma naraste in se izenači z zrnom grobozrnatih talin, katerim zrno bolj enakomerno narašča s temperaturo.

2. Z obema postopkoma toplotne obdelave je doseženo naslednje območje **trdote** od 131 do 179 HB pri temperaturah 900 do 1200° C (1 in 4 ure), s počasnim in izotermnim ohlajanjem. Ta trdota je manj odvisna od temperature, več od postopka toplotne obdelave in kemijske sestave, taline in posredno od premenskih točk.
3. **Trakavost** je bolj odvisna od načina ohlajanja kot od temperature avstenitizacije. Noliko je odvisna tudi od trajanja avstenitizacije.
4. Pri preiskovanih postopkih toplotne obdelave se dosega bolj **grobo zrno**:
 - z izbiro zrnatih talin po Mc Quaid-Ehnu,
 - z višjo temperaturo avstenitizacije in dovolj dolgim časom,
 - z dodatno normalizacijo pred popolnim žarjenjem ali s ponavljanjem žarjenja.
5. Dovolj **nizko trdoto** se dosega:
 - s čim počasnejšim ohlajanjem v temperaturnem območju od 750 do 650° C ali celo do konca premene pri 600° C,
 - z izotermno premeno pri temperaturi 620 do 630° C.
6. **Trakavost se zmanjša** oziroma odpravi:
 - z višjo temperaturo in daljšim časom (najmanj eno uro) avstenitizacije,
 - s čim hitrejšim ohlajanjem od temperature avstenitizacije do temperaturnega območja premene oziroma do temperature izotermne premene.
7. Ta toplotna obdelava (popolno žarjenje) za dosego feritno-perlitne strukture, posebno tisti pogoji, ki dajo grobo zrno, nikakor ne poslabša mehanskih lastnosti v končno toplotno obdelanem stanju. S končno toplotno obdelavo se pri fino-zrnatih talinah doseže popolnoma normalno strukturo in normalno velikost zrna: udarna žilavost pa je celo boljše, kot če bi predhodno, namesto popolno, samo mehko žarili. Pri končnem kaljenju pa tudi trakava struktura ne nastopa več.

Literatura

1. Kunze E. in H. Brandis, «Erzeugung bestimmter Gefüge in niedriglegierten Baustählen durch Glühen», Archiv für das Eisenhüttenwesen (Düsseldorf) 35 (1964), H. 12, str. 1187—1191.
2. Knorr, W., E. Habicht in H. Ch. Haumer, «Wärmebehandlung von Einsatzstahl 16 MnCr 5 zur Erlangung eines Gefügestandes bester Bearbeitbarkeit», Stahl und Eisen 83 (1963), Nr. 23, str. 1477—1484.
3. Werkstoffausschuss des VDE, «Vergleich der Ergebnisse von Zerspanbarkeitsuntersuchungen sowie von Gefüge- und Festigkeitsuntersuchungen an Einsatz- und Vergütungsstählen», Stahl und Eisen 83 (1963), H. 20, str. 1209—1226 in H. 21, str. 1302—1315.
4. Knorr, W., «Einfluss des Gefüges auf die Zerspanbarkeit von Baustählen», Härtereitechnische Mitteilungen (Stuttgart), Bd. 13 (1959), H. 3, str. 201—226.
5. Deutsche Normen, Einsatzstähle, Gütevorschriften, DIN 17210, 1965.
6. Koelzer, H., «Wärmebehandlung als Mittel zur Verbesserung der Zerspanbarkeit», Härtereitechnische Mitteilungen (Stuttgart), Bd. 6 (1950), H. 2, str. 41—59.
7. Bastien, P., «Einfluss metallurgischer Faktoren auf die Zerspanbarkeit der Stähle», Härtereitechnische Mitteilungen (Freiburg in Berlin) 16 (1961), H. 4, str. 210—217.
8. Legat, A., «Faktoren zur Beeinflussung der Härtebarkeit von Einsatzstählen», Härtereitechnische Mitteilungen (Stuttgart), Bd. 14 (1959), H. 1, str. 51—67.
9. Ammareller, S., «Untersuchungen über das Weichglühen unlegierter und niedriglegierter Stähle», Stahl und Eisen 70 (1950), N. 11, str. 459—463.
10. Jugoslovenski standard: JUS C.B9.020, 1957.

ZUSAMMENFASSUNG

Auf Grund der Daten aus der Fachliteratur wurden Untersuchungen durchgeführt, wie durch das Glühen des Stahles C 4320 (E1-80) eine bestimmte Gefügeausbildung zu erzielen, welche die deutschen Normen DIN 17210 für den Stahl 16 Mn Cr 5 vorschreiben.

Die einzelnen Parameter der Wärmebehandlung (Temperatur, Zeitdauer, Art der Abkühlung) welche folgenden Ansprüchen: der Korngrösse, Art des Gefüges, Härte und Zeilenstruktur entsprechen müssen, wurden an zehn Schargen erprobt.

Das verlangte Gefüge und die Härte lässt sich durch ein vollständiges Glühen erzielen, wobei ein einstündiges halten auf der Glüh Temperatur ausreicht. Bei höheren

Temperatur wird ein grösseres Korn erreicht. Um das Zeilengefüge beim Abkühlen zu verhindern muss, bis zu der Umwandlungstemperatur schnell genug abgekühlt werden.

Es ist auch eine Wärmebehandlung für die Ausbesserung des Werkstoffes welcher beim Glühen ein grobes Gefüge erhalten hatte, entwickelt worden. Durch ein zusätzliches Normalglühen des groben Gefüges lässt sich ein vollkommen normales Gefüge und eine normale Korngrösse erreichen. Die Zähigkeit wird aber sogar besser als wenn wir vorher statt Vollständigen Glühen nur Weichglühen würden. Auch das Zeilengefüge wird damit beseitigt.

SUMMARY

Basing on data from technical literature, an investigation of steel C.4320 (EC-80) heat treatment was made in order to obtain ferritic-pearlitic structure, prescribed by German standards DIN 17210 for steel 16 Mn Cr 5. Heat treating conditions (temperature, time of keeping at the temperature, way of cooling) were tested on ten melts to satisfy the following demands: grain size, structure type, hardness, and banded structure.

Demanded structure and hardness can be obtained by full annealing, where one hour keeping at the temperature is sufficient. Higher annealing temperature gives bigger grain; in order to eliminate appearance of banded struc-

ture at the cooling, sufficient cooling rate down to the transformation temperature range is necessary to be reached.

Heat treatment for improvement of the material, which was heat treated at the conditions leading to coarse grain, was also tested. With additional normalising of the coarse structure, quite normal structure and normal grain size was achieved. Impact toughness is even better than that when material was previously only softly annealed instead of being fully annealed. In this case also banded structure is eliminated.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании данных из специальной литературы исследована термообработка сталя C 4320 (EC-80) на феррито-перлитовую структуру в согласовании с западно-германскими промышленными стандартами DIN 17210, сталь 16 Mn Cr 5. На десяти плавках испытаны условия тепловой обработки (тем-а, время отжига, режим охлаждения) чтобы угодить требованиям т. е. величины зёрен, вида структуры, твёрдости и избежать появлению полосистой структуры. Требуемую структуру а также и твёрдость можно получить полным отжигом (Full Annealing) при чём длительность отжига всего один час. Замечено, что при повышенной тем-ы увеличивается величина зёрен. Чтобы избежать появлению полосовой

структуры необходимо быстрое охлаждение сталя до тем-ога предела.

Испытана также тепловая обработка улучшения качества материала который, первоначально под неблагоприятным тепловым режимом, дал грубую структуру. С дополнительным нормализованным грубой структуры зёрен получена исключительно нормальная структура и нормальная величина зёрен. При такой тепловой обработке оказалось, что ударная вязкость была выше вязкости которая получается мягким отжигом (Dead Annealing). При этом отстранена также полосовая структура.