

Visokotemperaturna cementacija

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

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

Uvod in dosedanje raziskave

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

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

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

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

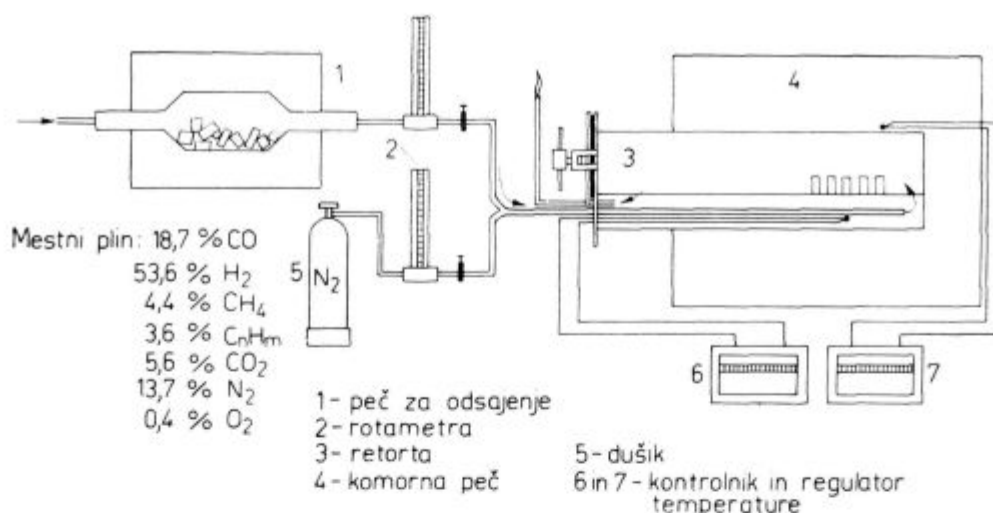
tura kaljene površinske plasti nekoliko grobejša pri vzorcih, ki so bili cementirani pri višjih temperaturah, vendar temperatura cementacije prav nič ne vpliva na izoblikovanje strukture, ako so bili vzorci kaljeni iz nižje temperature (C 15 iz 780°C, 16 MnCr 5 iz 860°C). Pričakovali bi, da bo po direktnem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

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

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

Načini cementiranja in vrste jekel

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



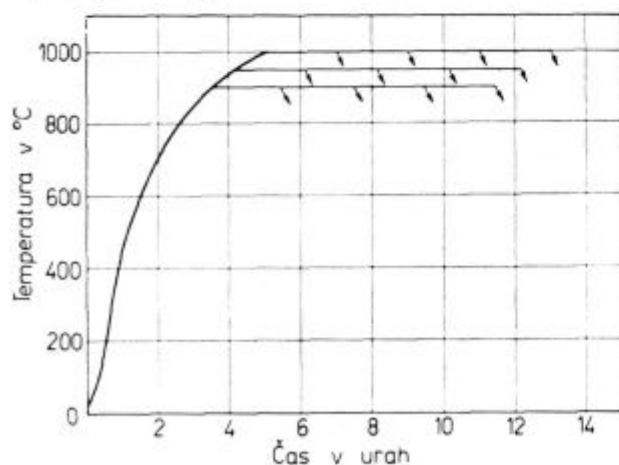
Slika 1
 Shema cementacijske naprave

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

TABELA 1 — Sestava mestnega plina

% CO	% H ₂	% CH ₄	% C _n H _m	% CO ₂	% N ₂	% O ₂
18,7	53,6	4,4	3,6	5,6	13,7	0,4

Nismo ugotavljali najugodnejšega pretoka plina skozi retorto. Pri vseh cementacijah je bil pretok, ki ga je kazal rotameter, 120 l/h: ker je pa rotameter umerjen za zrak s spec. težo 1,293 kg/m³, je bil resnični pretok plina s specifično težo 0,687 kg/m³ večji, in sicer 165 l/h.



Slika 2
 Naraščanje temperature vzorcev

Temperaturni in časovni režim cementacij:

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

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

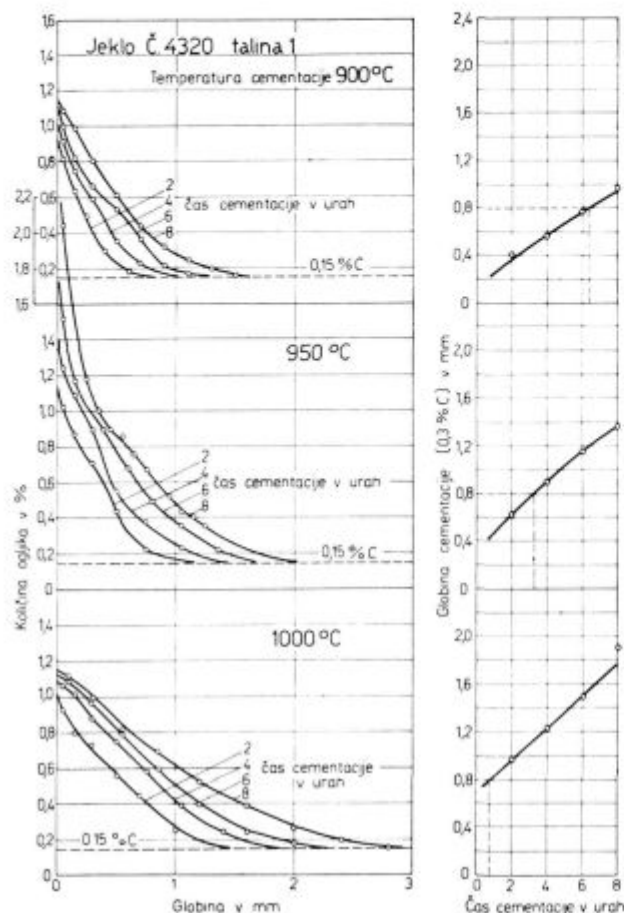
Jekla: izbrali smo dve talini jekla Č. 4320 in eno talino jekla Č. 7420, katerih kemično sestavo kaže tabela 2.

TABELA 2 — Kemična sestava preskušanih jekel

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

Določitev osnovnih parametrov cementiranja pri različnih temperaturah

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



Slika 3

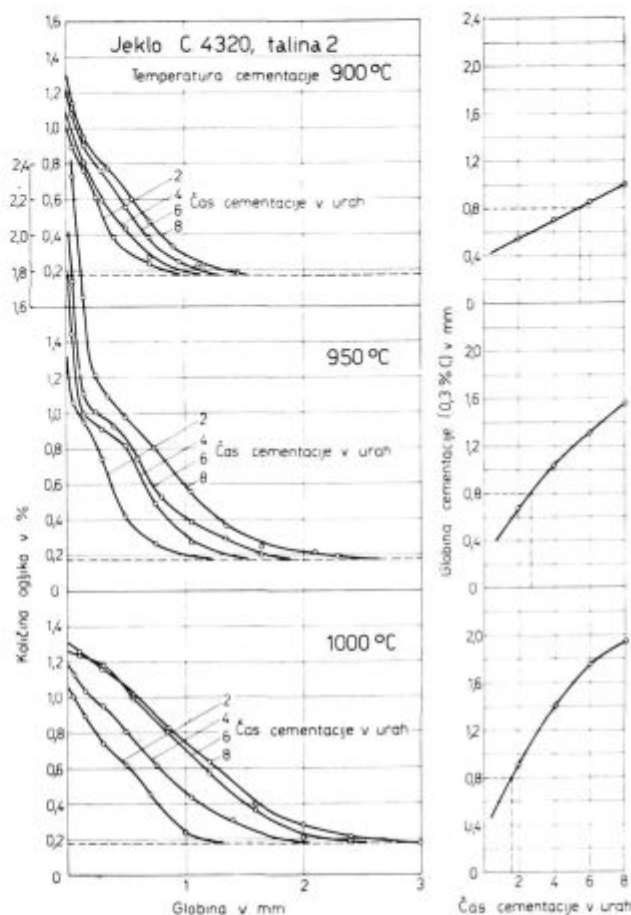
Količina ogljika v cementirani plasti po različnih temperaturah in časih cementiranja in globina cementacije v odvisnosti od časa cementiranja za jeklo Č. 4320, talina 1

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

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

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

S povečanjem cementacijske temperature od 900 do 1000°C se torej poveča hitrost cementiranja približno za 100 %. To je razumljivo, ker je tudi gibljivost ogljikovih atomov pri višjih temperaturah večja. J. Pomey navaja sledeče koeficiente difuzije ogljika v železu: pri 900°C $4 \cdot 10^{-7}$, pri 950°C $9 \cdot 10^{-7}$ in pri 1000°C $20 \cdot 10^{-7}$ cm²/s.



Slika 4

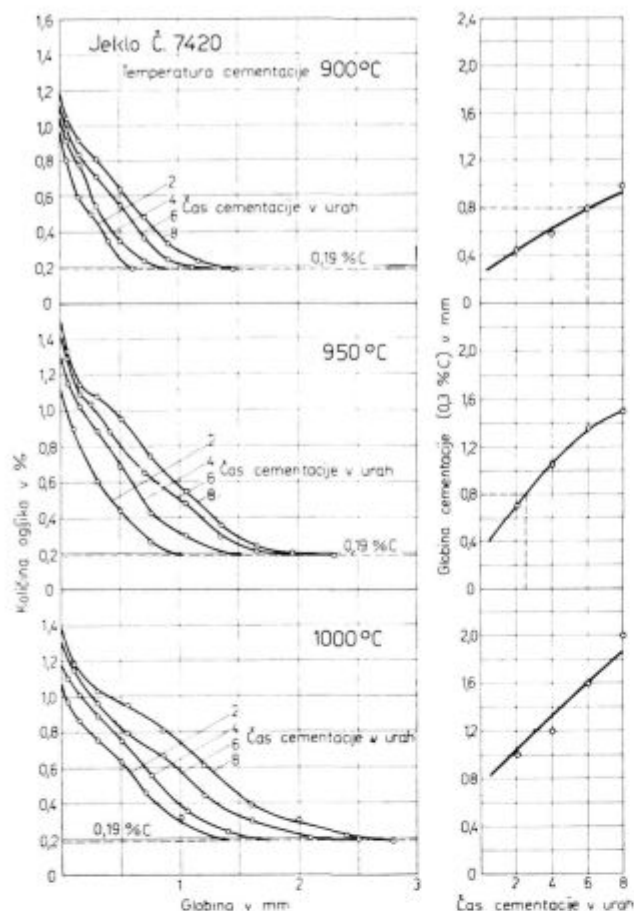
Količina ogljika v cementirani plasti po različnih temperaturah in časih cementiranja in globina cementacije v odvisnosti od časa cementiranja za jeklo Č. 4320, talina 2

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

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

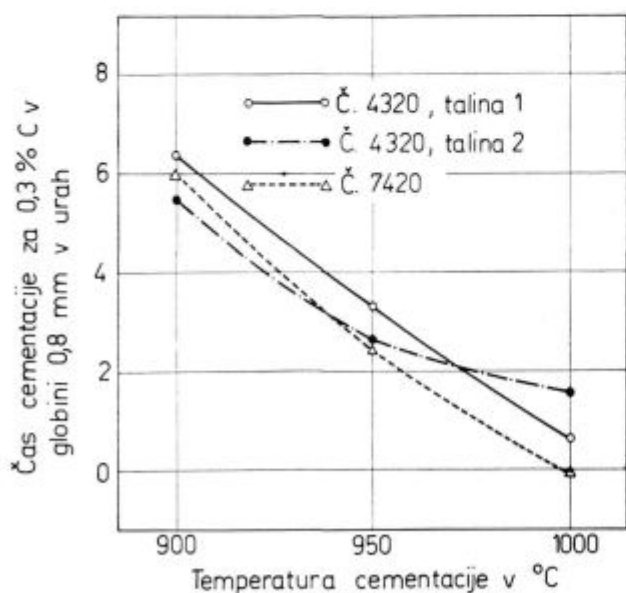
Tudi v standardni cementaciji niso bistvene razlike med talinami, razen pri 1000°C. Kljub temu smo vzeli poprečja, da smo lahko skupaj cementirali preskušance za poznejše mehanske preiskave.

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



Slika 5

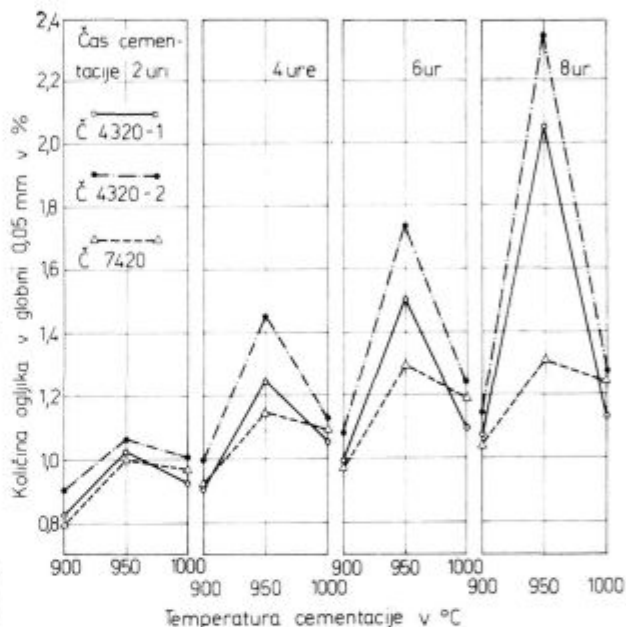
Količina ogljika v cementirani plasti po različnih temperaturah in časih cementiranja in globina cementacije v odvisnosti od časa cementiranja za jeklo Č. 7420



Slika 6

Standardna cementacija v odvisnosti od temperature

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



Slika 7

Površinske količine ogljika v odvisnosti od temperature in časa cementiranja

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

TABELA 3 — Površinske količine ogljika po standardnih cementacijah

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

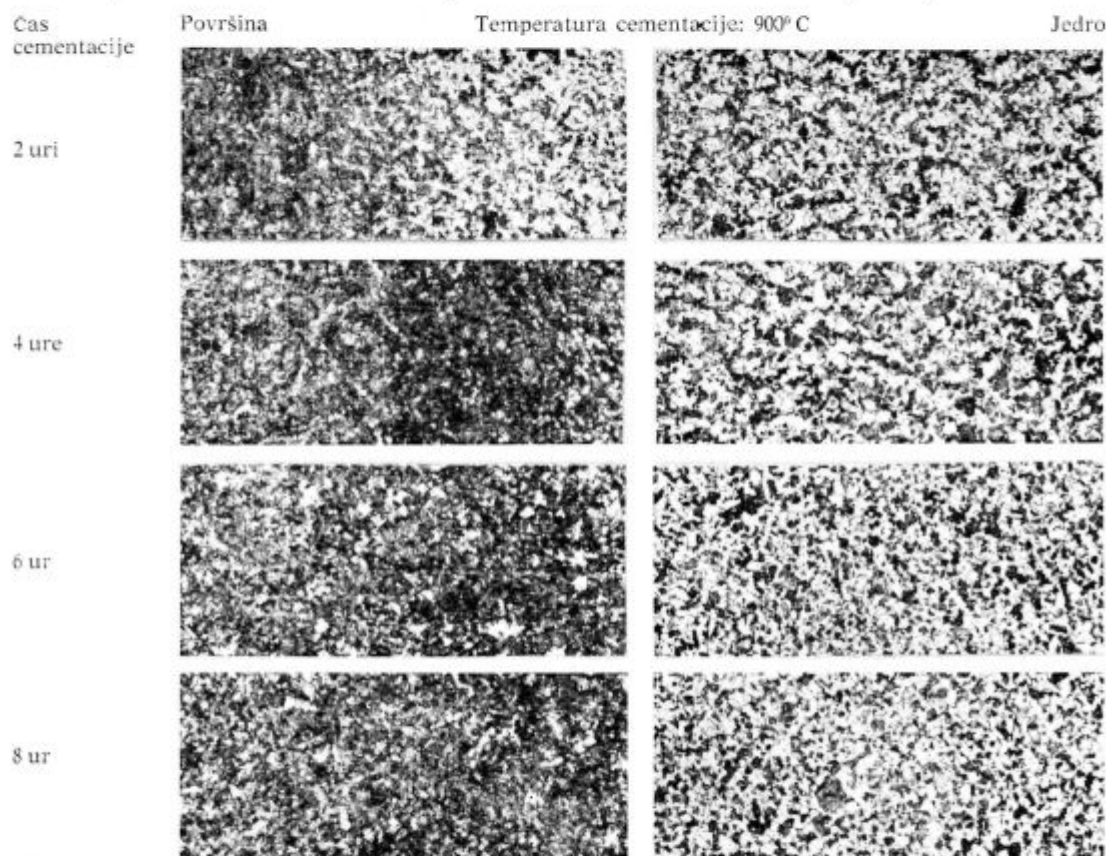
Opomba: Za standardno cementacijo pri 1000° C, ko je potreben čas le 1 ura, smo površinsko količino ogljika interpolirali iz krivulj.

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

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

Metalografske preiskave

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



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

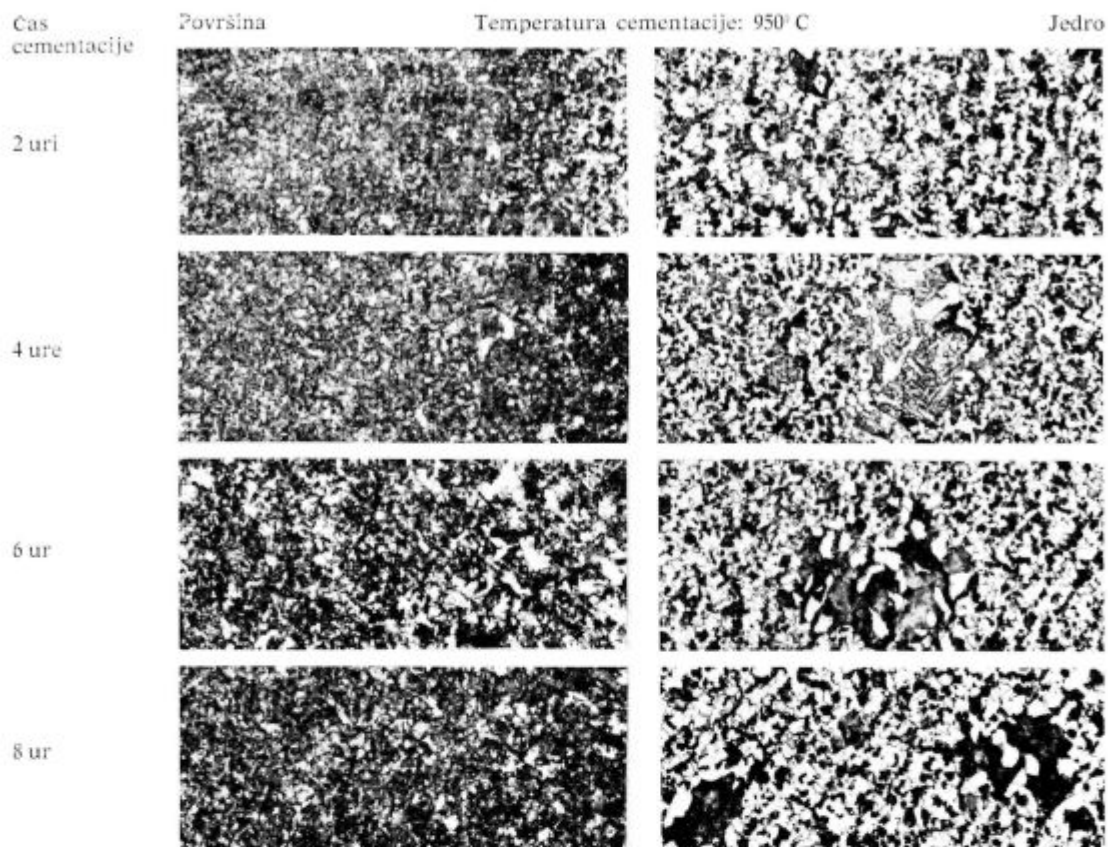
pri ohlajevanju transformirajo bainitsko. Popolna grobozrnatost ne nastane niti po 8-urni cementaciji na 1000° C. Najpomembnejša je pa seveda primerjava med strukturami po standardni cementaciji pri različnih temperaturah. Po 6 urah cementiranja na 900° C je struktura normalno drobnozrnata, po 3 urah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

Sklepi

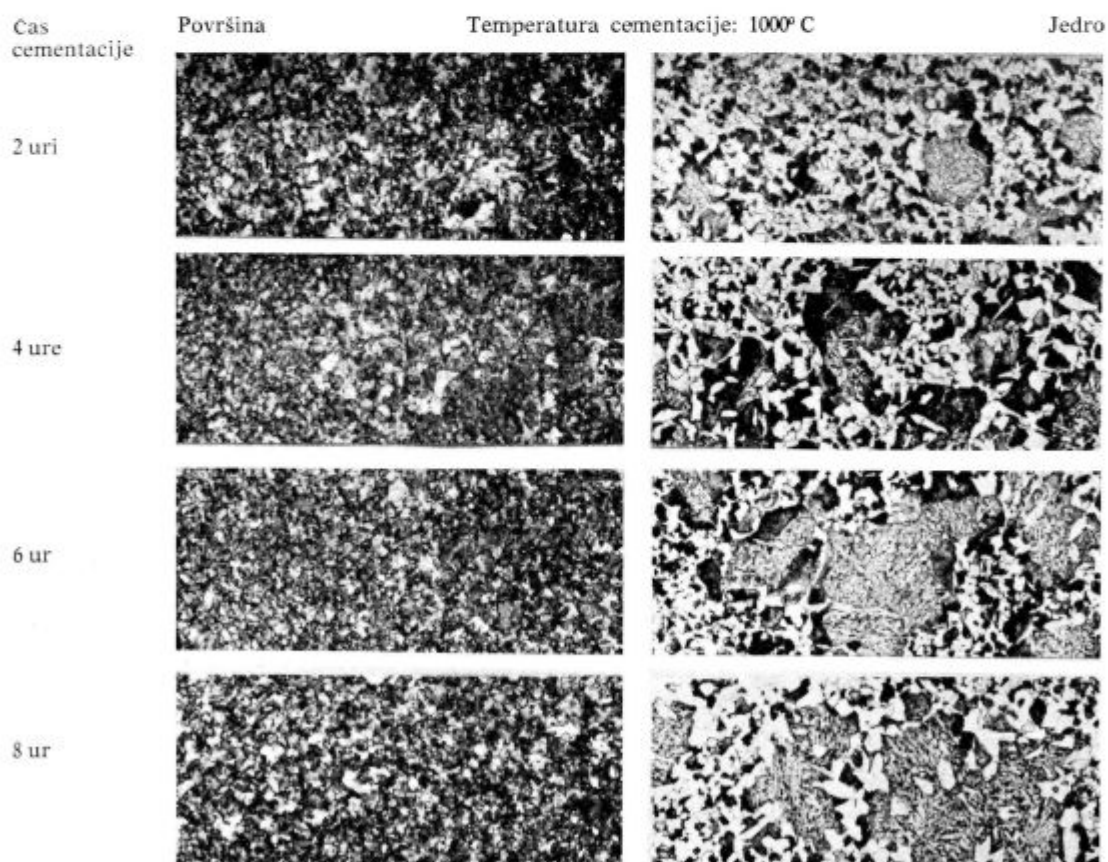
Z dvema talinama jekla Č. 4320 in eno talino jekla Č. 7420 smo izvršili vrsto preiskav visokotemperaturne cementacije. Rezultati so sledeči:

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

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



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



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

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

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

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

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

Literatura:

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