

## Uvajanje postopka mehkega žarjenja s kontinuirnim ohlajanjem v industrijskih žarilnih pečeh

*Za mehko žarenje nizko legiranih orodnih jekel, jekel zaboljšanje ter jekel za kvalitetne vijake v industrijskih pečeh, kontinuirnih in stacionarnih, smo uvedli postopek žarenja s kontinuirnim ohlajanjem. Prednosti tega postopka pred izotermnim žarenjem so v tem, da dosežemo zahtevano trdoto jekla ter visoko stopnjo koagulacije cementita ob boljšem razmešanju strukturnih komponent, v krajšem času. Poboljša se nam torej kvaliteta jekla ter poviša storilnost žarilnih peči.*

### 1. UVOD

Orodna jekla ter jekla zaboljšanje v vroče valjanem stanju navadno niso takoj primerna za nadaljno predelavo v hladnem, ker so pretrda in nimajo ugodne mikrostrukture. Jekla imajo v vroče valjanem stanju zelo neenakomerno mikrostrukturo po preseku. Odvisna je od vrste jekla, dimenzije valjancev, pogojev vročega valjanja in ohlajevanja po valjanju. Da bi bilo mogoče jeklo hladno predelati, ga je torej potrebno ustrezno toplotno obdelati.

Predelava v hladnem obsega:

obdelavo z odrezovanjem (s tvorbo odrezka)  
plastično preoblikovanje (brez tvorbe odrezka).

Obdelava jekla z odrezovanjem zahteva zadovoljivo vzdržnost rezalnega orodja, plastično preoblikovanje pa veliko plastičnost jekla.

V zadnjem desetletju zaznavamo v obdelovalni tehniki tendenco zamenjati preoblikovanje v vročem stanju ter obdelavo z odrezovanjem s plastičnim preoblikovanjem v hladnem stanju z velikimi pritiski in globokim vlečenjem. To ugotovitev potrjuje hitro naraščanje proizvodnje strojev za plastično preoblikovanje v hladnem, hkrati s tem pa tudi velika aktivnost znanstveno raziskovalnega dela na tem področju.

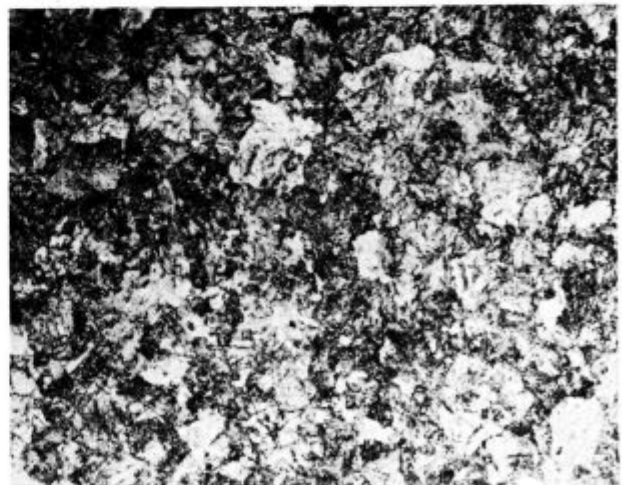
Pri obeh načinih predelave v hladnem se primarno zahteva nizka trdnost jekla. Izkušnje pri predelavi jekel kažejo, da je oblika mikrostrukture za obnašanje jekel pri predelavi v hladnem bolj pomembna kakor nizka trdnost.

Mikrostruktura toplotno obdelanega jekla je sestavljena iz ferita in karbidov. Karbidi so lahko v obliki lamel ali kroglic. V splošnem pa velja: čim

večja je razdalja med karbidi, tem bolj odprta je struktura in jeklo je mehkejše.

Lamelarni perlit je normalni produkt transformacije avstenita nizko in srednje legiranih jekel. Čim višja je temperatura transformacije, tem bolj grobe so lamele perlita in jeklo je mehkejše. Kljub nizki trdoti pa je lamelarna oblika cementita lahko vzrok razpokam, ki se pojavljajo že pri relativno ostrejši hladni deformaciji jekla. Pri obdelavi jekla z odrezovanjem ima lamelarna oblika cementita sicer ugoden vpliv na kvaliteto površine obdelovancev, vendar pa je obraba rezalnega orodja večja kot pri obdelavi z odrezovanjem jekel, ki imajo krogličasto obliko cementita. Iz navedenih vzrokov lahko v splošnem zaključimo, da je lamelarna oblika cementita neprimerna za hladno predelavo orodnih jekel ter jekel zaboljšanje, kjer se zahteva visoka plastičnost ali pa dobra obdelovalnost jekla z odrezovanjem.<sup>1</sup> Pri teh jeklih je torej potrebno s toplotno obdelavo vroče valjanega jekla doseči nizko trdoto s krogličasto obliko cementita. Postopek toplotne obdelave, ki vodi h krogličasti obliki cementita, imenujemo **mehko žarjenje**. Uspeh mehkega žarjenja se ocenjuje z doseženo trdoto ter deležem koaguliranega cementita.

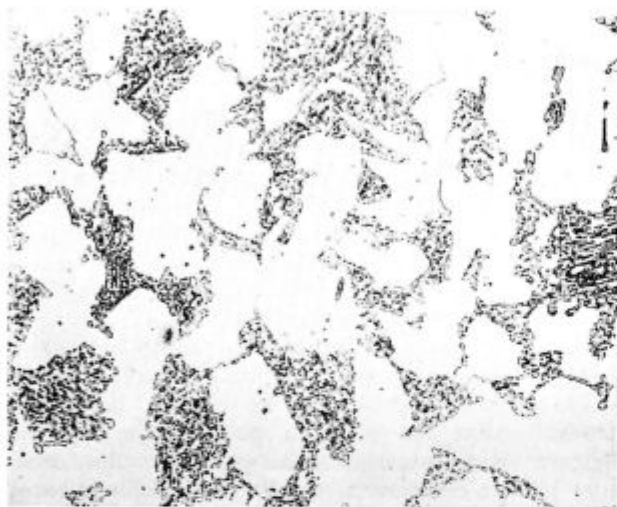
Najstarejši in najenostavnejši postopek mehkega žarjenja je **izotermno žarjenje** jekla, in sicer pri temperaturah pod kritično točko  $A_{c1}$  (sl. 3 a). Uspeh tega žarjenja je zelo odvisen od izhodne mikrostrukture jekla. Ta postopek mehkega žar-



Slika 1  
Mikrostruktura jekla C 4146 v vroče valjanem stanju

jenja je posebno primeren za žarjenje jekel z martenzitno, bainitno ali sorbitno strukturo ali pa za jekla v hladno predelanem stanju. Orodna jekla ter jekla za poboljšanje pa imajo v vroče valjanem stanju zelo **neenakomerno mikrostrukturo, srednje do grobo lamelarnega perlita**.

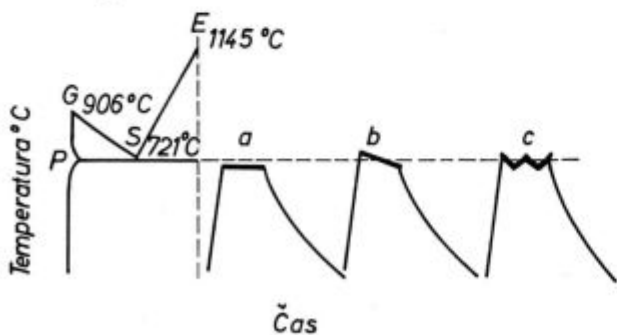
Za koagulacijo tako oblikovanega cementita z izotermnim žarjenjem so potrebni **zelo dolgi časi**. Po mehkem žarjenju ostanejo karbidi neenakomerno porazdeljeni po preseku, saj v tem primeru ne pride do razmešanja strukturnih komponent (sl. 2).



Slika 2  
Mikrostruktura jekla C 1430 po izotermnem žarjenju  $\times 500$

Iz navedenih razlogov je torej postopek izotermnega žarjenja za mehko žarjenje orodnih jekel ter jekel za poboljšanje neekonomičen in za mnoge svrhe uporabe jekla, kjer se zahteva enakomerna porazdelitev strukturnih komponent, tudi neprimeren.

Že leta 1925 sta Körber in Köster predlagala »hitro metodo« mehkega žarjenja orodnih jekel ter jekel za poboljšanje. Bistvo te metode je v tem, da se jeklo za kratek čas ogreje nad kritično temperaturo  $A_{c1}$  ter nato iz te temperature počasi ohlaja. Različne variante te metode mehkega žarjenja lahko združimo v dva postopka, ki sta shematsko prikazana na sl. 3.



Slika 3  
Shema postopkov mehkega žarjenja jekla

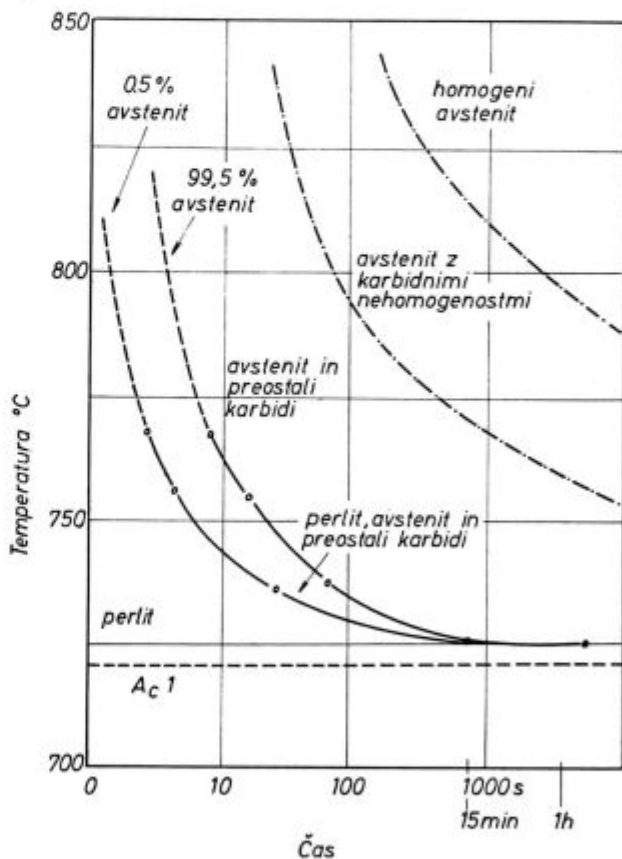
Ker poteka mehko žarjenje po hitri metodi na različnih temperaturnih nivojih, so za mehko žarjenje obravnavanih jekel najbolj primerne večconske kontinuirne žarilne peči.<sup>6</sup> Vendar pa je mogoče hitre metode uporabiti tudi za mehko žarjenje jekel v stacionarnih žarilnih pečeh.

## 2. TEORETIČNE OSNOVE

### 2.1 Perlitska premena na globularni cementit

Iz dosegljivih virov posnemamo naslednjo teoretično razlago perlitne premene na globularni cementit. Med ogrevanjem se v jeklu postopoma vršijo naslednje pretvorbe:

1. začetek premene ferita v avstenit na kritični temperaturi  $A_{c1}$ ,
2. začetek topnosti karbidov v avstenitu — heterogeni avstenit
3. konec premene ferita v avstenit na temperaturi  $A_{c3}$
4. konec topnosti karbidov v avstenitu — homogeni avstenit



Slika 4  
Pretvorba perlita v avstenit pri eutektoidnem jeklu

Na sliki 4 so razvidne vse faze pretvorbe perlita v avstenit v eutektoidnem jeklu (0,78 % ogljika) v odvisnosti od temperature ogrevanja ter časa držanja na temperaturi.

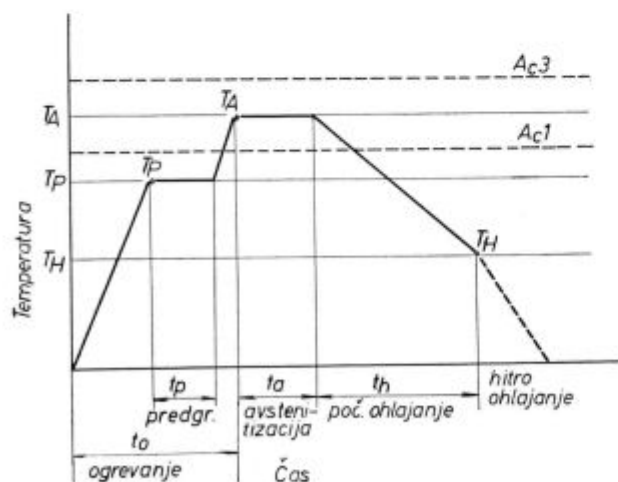
Osnovni pogoj, ki odloča o obliki cementita po končanem žarjenju, je iskati v začetnih pogojih žarjenja, t. j. v **obliki kali** v osnovni strukturi. Dokazano je bilo namreč naslednje<sup>2</sup>: če so kali orientirane in imajo obliko lamel ali diskov, je tudi cementit po žarjenju v obliki lamel; če pa imajo kali krogličasto ali ovalno obliko, pa ima tudi cementit po žarjenju ovalno obliko. Jasno je, da obstaja tudi stanje, ko sta prisotni obe vrsti kali.

Pogoji za razvoj omenjenih kali so podani s stanjem izhodne strukture, iz katere se jeklo počasi ohlaja. Medtem, ko v homogenem avstenitu nastanejo orientirane kali le na mejah avstenitnih zrn, pa so v heterogenem avstenitu kali že prisotne, tako na mejah avstenitnih zrn kakor tudi znotraj le-teh. V heterogenem avstenitu nastopajo tako kot kali neraztopljeni karbidi kakor tudi lokalne nehomogenosti ogljika na mestih raztopljenih karbidov.

Če izhajamo iz stanja, ki pogojuje tvorbo samo globularnega cementita in ogrevamo jeklo v smeri stanja, ki pogojuje tvorbo samo lamelarnega cementita, bo rezultirajoča struktura samo globularni cementit le do neke **spodnje kritične meje**, pri kateri količina prisotnih kali v heterogenem avstenitu ne pade pod neko **spodnje kritično število**. V kolikor pa je homogenizacija avstenita večja in je količina prisotnih kali v heterogenem avstenitu pod spodnjim kritičnim številom, nastajajo v avstenitu področja, v katerih niso dani pogoji za tvorbo globularnega cementita. Globularni cementit se izloča le do **neke zgornje kritične meje**. Nad zgornjo kritično mejo rezultira po ohlajevanju samo lamelarni cementit.

## 2.2 Postopek mehkega žarjenja s kontinuirnim ohlajanjem

Celotni postopek mehkega žarjenja s kontinuirnim ohlajanjem je potrebno obravnavati po posameznih fazah, ki ga sestavljajo. Vodenje vsake od teh faz pa je odvisno od **kemične sestave jekla**, ki ga mehko žarimo. Shematično je obravnavani po-



Slika 5

Schema postopka mehkega žarjenja s kontinuirnim ohlajanjem

stopke žarjenja s kontinuirnim ohlajevanjem predstavljen na sliki 5.

Karakteristike posameznih faz žarjenja so naslednje:

### 2.2.1 Temperatura avstenitizacije (TA)

Stopnja heterogenosti avstenita je odvisna od temperature avstenitizacije jekla. Jeklo je treba ogreti na temperaturo, ki leži pod spodnjo kritično mejo. Pri teh temperaturah ostane namreč velika količina karbidov neraztopljena. Proces, ki se odvija na tej temperaturi, sestoji iz raztapljanja finih karbidov ob istočasni rasti grobih karbidov zaradi izločanja iz nasičenega avstenita.<sup>2</sup> Rast večjih karbidov se lahko pospeši s prehodnim žarjenjem na temperaturi, ki leži pod kritično temperaturo  $A_{c1}$  ( $T_p$ ). To fazo žarjenja imenujemo **predgrevanje**.<sup>1</sup> Čim nižja bo temperatura avstenitizacije, tem bolj bomo oddaljeni od pogojev, ki so podani s spodnjo kritično mejo. Globule cementita bodo sicer v pribitku, vendar pa bodo v strukturi mehko žarjenega jekla gnezda z nedokončano koaguliranim cementitom. Nobena še tako majhna hitrost ohlajevanja ne zadostuje za nastanek koaguliranega cementita, če ni zadovoljive velikosti in porazdelitve kali v osnovni strukturi jekla pred pričetkom ohlajevanja.

### 2.2.2 Trajanja avstenitizacije ( $t_a$ )

Če žarimo jekla v najugodnejšem temperaturnem območju avstenitizacije, ima trajanje avstenitizacije na homogenizacijo avstenita podoben vpliv kot znižanje ali zvišanje temperature avstenitizacije. Kljub temu pa dolgo zadrževanje na nižjih temperaturah avstenitizacije ne da ugodnih rezultatov, ker v jeklu ni potrebnega števila kali.

### 2.2.3 Ohlajanje iz temperature avstenitizacije

Pogoje ohlajevanja iz temperature avstenitizacije določa oblika TTT diagramov za določeno vrsto jekla, ki jo žarimo. Pogoji ohlajevanja so podani z:

- optimalno hitrostjo ohlajevanja
- minimalno temperaturo, do katere se jeklo počasi ohlaja ( $T_H$ )

Da bi dosegli najmehkejšo strukturo, je potrebno pretvorbo heterogenega avstenita končati pri čim višjih temperaturah. Visoka temperatura transformacije pa je pogojena z nizkimi ohlajevalnimi hitrostmi. Za prakso je primerno, da izberemo takšno temperaturo transformacije, ki jo dosežemo v doglednem času. Najbolj pogosto se izvrši transformacija s **kontinuirnim ohlajanjem**. Mogoče pa je tudi **stopničasto ohlajevanje** z izotermnimi žarjenji na različnih temperaturnih nivojih. Če je temperatura transformacije enaka, sta si oba načina ohlajevanja ekvivalentna. Po pričetku ohlajevanja je ugodno jeklo **podhladiti**.<sup>4</sup> S tem se poveča število kali, kar med razpadanjem avstenita ugodno vpliva na tvorbo koaguliranega cementita.

### 3. EKSPERIMENTALNO DELO V LABORATORIJU

Da bi lahko uvedli »hitre metode« za mehko žarjenje orodnih jekel ter jekel za poboljšanje v industrijskih žarilnih pečeh, je bilo potrebno izvršiti številne laboratorijske poizkuse.

Za posamezne kvalitetne grupe jekel so bili na osnovi TTT diagramov<sup>5</sup> ter dilatometrične preiskave kritičnih premenskih točk izdelani poizkusni programi žarjenja, po katerih smo žarili vzorce jekla v laboratorijski programski peči, ki je prikazana na sliki 6.



Slika 6  
Laboratorijska programska žarilna peč

Namen teh preiskav je bil ugotoviti optimalne pogoje v posameznih fazah žarjenja, kar naj bi, upoštevajoč specifične zahteve posameznih kvalitet jekel, vodilo k optimalni storilnosti industrijskih žarilnih pečeh. Posebno pozornost smo posvetili tudi **združevanju** režimov žarjenja za posamezne grupe jekel. Minimalno število ciklov žarjenja je namreč eden izmed osnovnih pogojev za doseg optimalne storilnosti pečeh.

S poizkusnimi programskimi žarjenji v laboratorijski žarilni peči smo študirali optimalne cikle za mehko žarjenje orodnih jekel, jekel za kvalitetne vijake ter nizko legiranih konstrukcijskih jekel za poboljšanje. Problematika osvajanja mehkega žarjenja po postopku s kontinuirnim ohlajevanjem je za posamezne obravnavane kvalitetne grupe jekel naslednja:

#### 3.1 Orodna jekla

Z mehkim žarjenjem orodnih jekel je treba doseči čimbolj popolno sferoidizacijo karbidov, ob predpisani zrnatosti karbidnih zrn. Orodna jekla moramo torej **sferoidizacijsko žariti**.<sup>4</sup>

Pri naših poizkusih smo obravnavali predvsem problematiko sferoidizacijskega žarjenja nizkolegiranih orodnih jekel (legirano s Cr, Cr-V, Cr-W-V) jekel.

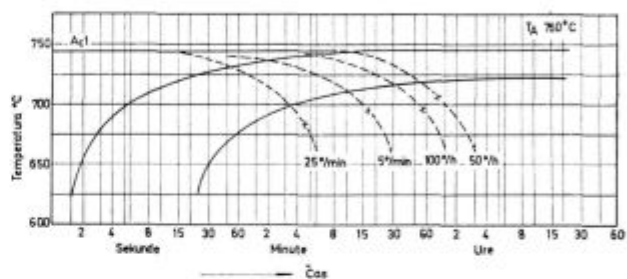
Vsa ta jekla imajo glede premenskih točk veliko skupnega, kar zelo olajša sestavljanje enotnega ciklusa za sferoidizacijsko žarjenje obravnavanih jekel. Te skupne točke so:

a) jekla vsebujejo karbidotvorne elemente Cr, W, V, ki tvorijo v jeklu stabilne karbide, kar zvišuje spodnjo kritično mejo;

b) kritične premenske točke ležijo zelo skupaj; tudi višina temperature kritičnih točk je za vsa obravnavana jekla približno enaka.

c) vsa ta jekla imajo zelo podoben potek TTT krivulj v zgornjem perlitnem območju, ki je pomembno za sferoidizacijsko žarjenje.

Karakteristično obliko TTT diagrama lahko prestavimo z diagramom za orodno jeklo za 1 % C in 1,5 % Cr (slika 7).



Slika 7  
TTT krivulja za orodno jeklo 1 % C in 1,5 % Cr

Na sliki 7 so s prekinjenimi črtami vrisane tudi krivulje za kontinuirno ohlajevanje iz temperature  $A_{c1}$ . S križki so označene temperature, kjer se pri kontinuirnem ohlajevanju transformacija zaključí.

Iz vsega povedanega sledi, da je za efekt sferoidizacijskega žarjenja nizko legiranih orodnih jekel, ob upoštevanju osnovnih zahtev, primarna hitrost ohlajevanja iz temperature avstenitizacije, saj le-ta določa temperaturo konca transformacije. Znano pa je da, čim višja je temperatura transformacije, tem mehkejša je jeklo.

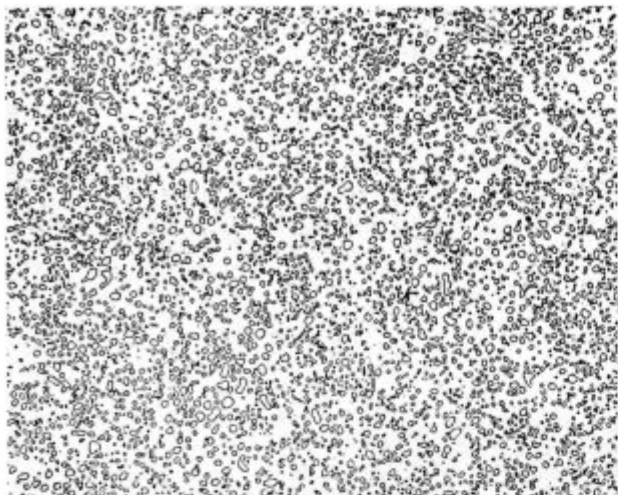
S poizkusi je potrebno določiti hitrost ohlajevanja, oz. temperaturo konca transformacije, pri kateri dobimo zaželeno strukturo jekla v ekonomsko utemeljenem času trajanja ciklusa.

Nizko legirana orodna jekla je torej mogoče sferoidizacijsko žariti po enotnem ciklusu žarjenja, pri katerem, z ozirom na zahtevano trdoto in zrnatost karbidov, spreminjamo hitrost ohlajevanja. Temperaturni pogoji žarjenja so naslednji:

- temperatura avstenitizacije 770—800° C
- temperatura ohlajevanja 600° C.

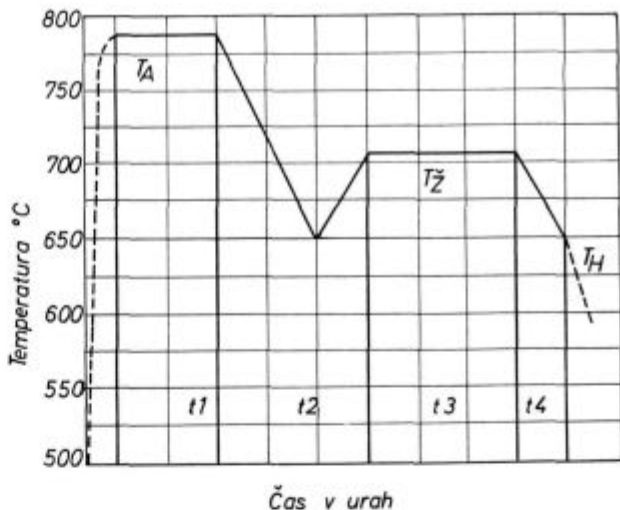
Vpliv hitrosti ohlajevanja na zrnatost karbidov pri sferoidizacijskem žarjenju nizko legiranega orodnega jekla (1 % C, 1,5 % Cr) je prikazana na sliki 8 in sl. 9.

Z namenom, da čimbolj skrajšamo potreben čas za sferoidizacijsko žarjenje nizkolegiranih orodnih jekel, smo opravili tudi preizkuse sferoidizacijskega žarjenja z vmesno fazo **podhlajevanja**.



Slika 8

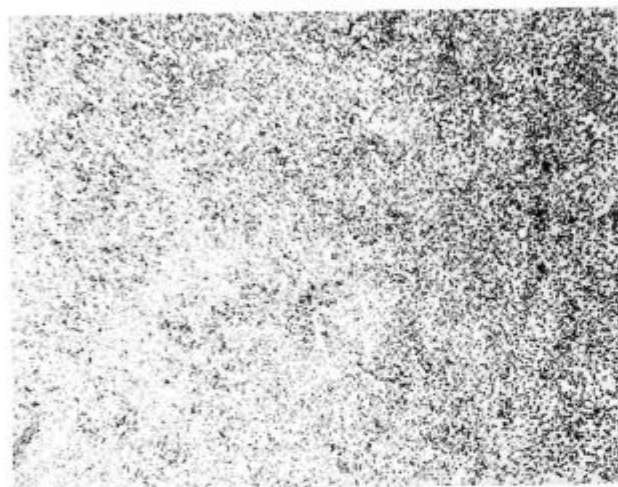
Mikrostruktura nizkolegiranega orodnega jekla po sferoidizacijskem žarjenju (hitrost ohlajevanja — 9° C/h × 500)



Čas v urah

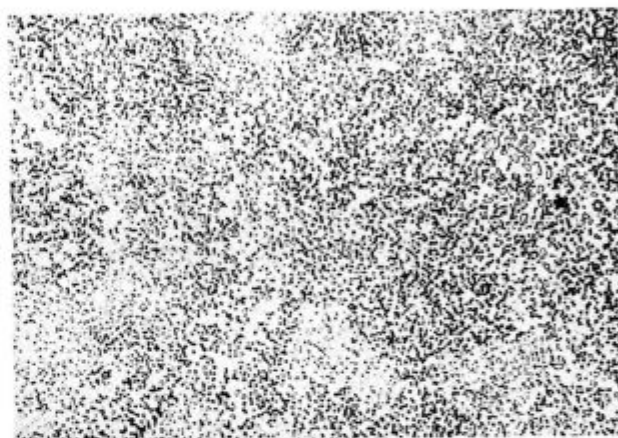
Slika 10

Ciklus sferoidizacijskega žarjenja z vmesno fazo podhlajevanja



Slika 9

Mikrostruktura nizkolegiranega orodnega jekla po sferoidizacijskem žarjenju (hitrost ohlajevanja — 45° C/h × 500)



Slika 11

Mikrostruktura nizkolegiranega orodnega jekla po sferoidizacijskem žarjenju s podhlajevanjem × 500

Potek takega ciklusa je prikazan v diagramu na sliki 10.

Dosežena oblika mikrostrukture orodnega jekla, sferoidizacijsko žarjenega po tem ciklusu, je prikazana na sliki 11.

### 3.2 Jekla za kvalitetne vijake

Tehnologija izdelave vijakov in matic združuje plastično preoblikovanje in obdelavo z odrezovanjem. Da bi zadovoljili zahtevam po dobri plastičnosti in obdelovalnosti, morajo biti jekla sferoidizacijsko žarjena. Zahtevana stopnja sferoidizacije cementita znaša min. 90 %. Zaželeno je tudi enakomerna porazdelitev zrn cementita v feritni osnovi.

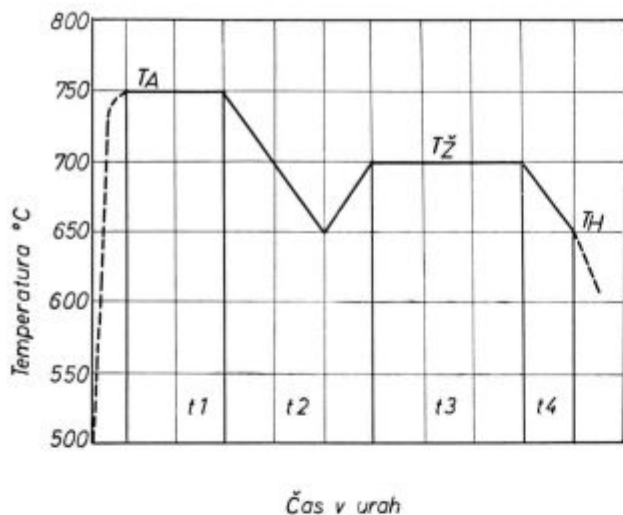
Struktura ogljikovih, pa tudi nizko legiranih jekel za kvalitetne vijake v vroče valjanem stanju je feritno perlitna in navadno zaradi karakteristik perlita (gnezda, široke lamele) za sferoidizacijo zelo neugodna.

V laboratoriju smo pristopili k študiju postopka sferoidizacijskega žarjenja jekel za kvalitetne vijake na naslednji način:

Na osnovi premenskih točk, TTT diagramov in priporočil iz literature smo sestavili dva osnovna ciklusa žarjenja ter preiskali vpliv posameznih parametrov žarjenja na doseženo stopnjo sferoidizacije jekel. Posebno pozornost smo posvetili tudi študiju vpliva oligo elementov Cu in Ni, ki sta v vse večji meri prisotna v naših jeklih, na koagulacijo cementita.<sup>3</sup>

Pri študiju optimalnega režima sferoidizacijskega žarjenja nizkolegiranih jekel za kvalitetne vijake, smo se držali že opisanega zaporedja faz, ki sestavljajo ciklus mehkega žarjenja s kontinuirnim ohlajevanjem.

Pri študiju optimalnega režima sferoidizacijskega žarjenja ogljikovih jekel za kvalitetne vijake, pa smo se odločili za poseben režim, ki je prikazan na sliki 12.



Čas v urah

Slika 12

Shema režima sferoidizacijskega žarjenja ogljikovih jekel za kvalitetne vijake

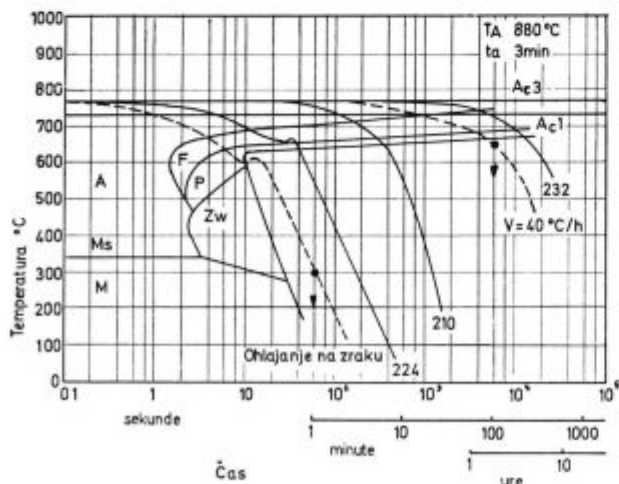
Posebnost tega postopka je podhlajevanje, kateremu sledi izotermno mehko žarjenje pod temperaturo  $A_{c1}$ . Pri proučevanju posameznih faz cikla smo ugotovili naslednje:

a) jekla je potrebno avstenitizirati pri temperaturi pod  $770^{\circ}\text{C}$ , s tem da doba trajanja avstenitizacije ni večja od 4 ur. Ta rezultat je v skladu z nizko spodnjo kritično temperaturno mejo, ki je lastna nelegiranim jeklom, pri katerih ni stabilnih karbidov.

b) jeklo se mora pohladiti do temperature  $650^{\circ}\text{C}$  s hitrostjo ohlajevanja, ki ni večja od  $50^{\circ}\text{C/uro}$ .

Poizkusi so pokazali, da so ugodne tudi velike hitrosti ohlajevanja, npr. ohlajevanje na zraku do  $300^{\circ}\text{C}$ . To si lahko razlagamo z ugodnim vplivom fino lamelnariga perlita, ki se izloča pri hitrem ohlajevanju in ki se v nadaljnji fazi izotermnega žarjenja zelo lahko sferoidizira.

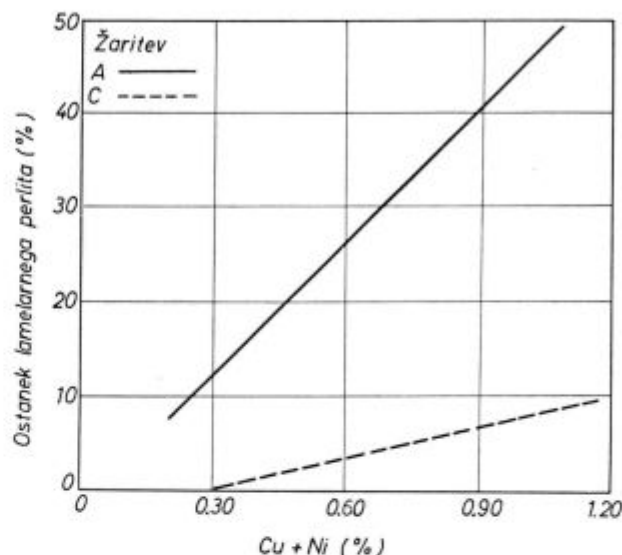
V kontinuirnem diagramu na sl. 13 za jeklo CQ 45 sta vnešeni obe hitrosti ohlajevanja.



Slika 13

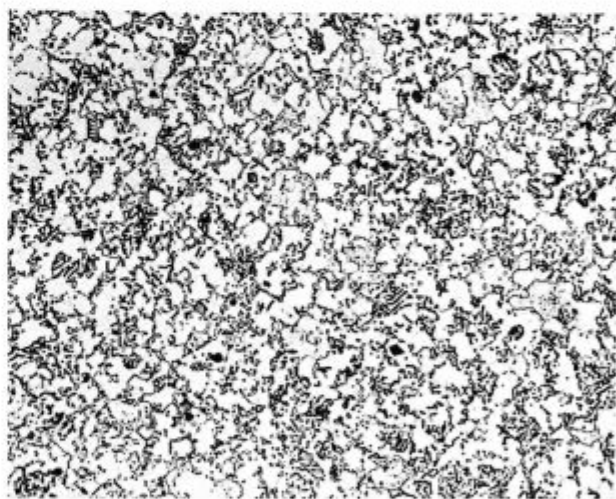
Kontinuirni TTT diagram za jeklo CQ 45

Z naraščanjem vsebnosti oligo elementov — Cu in Ni v jeklu se večja odpor proti sferoidizaciji cementita. Pri žarjenju s hitrim ohlajevanjem (žaritev C) je ta efekt manjši kot pri žarjenju s počasnim ohlajevanjem (žaritev A). Vpliv vsebnosti Cu in Ni na doseženo stopnjo sferoidizacije pri optimalnem ciklusu s počasnim ohlajevanjem ter pri postopku s hitrim ohlajevanjem ilustriramo z diagramom na sliki 14 in metalografskimi posnetki sl. 15, 16 in 17.



Slika 14

Vpliv vsebnosti Cu in Ni na doseženo stopnjo sferoidizacije pri različnih hitrostih ohlajevanja

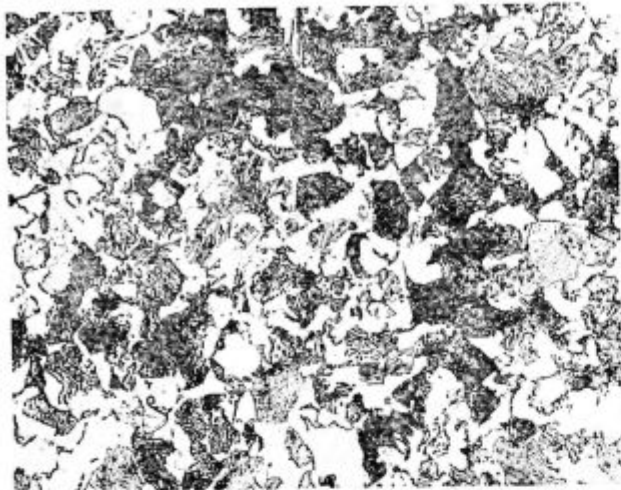


Slika 15

Mikrostruktura jekla CQ 45 po žarjenju s počasnim ohlajevanjem (vsebnost Cu + Ni pod  $0,3\%$   $\times 500$ )

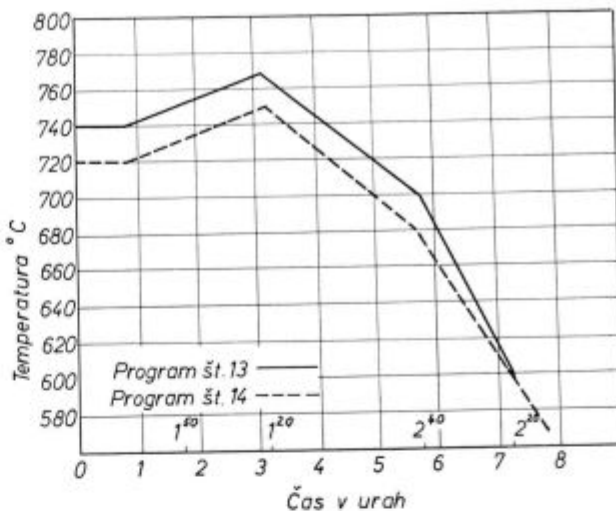
### 3.3 Nizkolegirana jekla za poboljšanje

Namen laboratorijskih žarenj je bil, poiskati tak režim mehkega žarjenja nizko legiranih jekel za poboljšanje, s katerim bi pri maksimalni storilnosti peči dosegli optimalno (maks. dovoljeno)



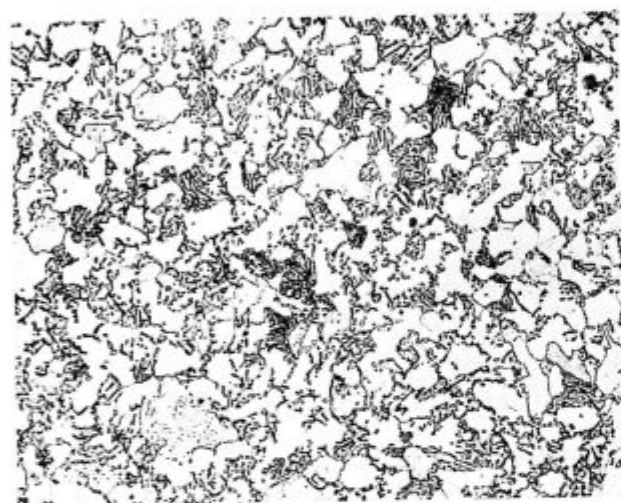
Slika 16

Mikrostruktura jekla CQ 45 po žarjenju s počasnim ohlajevanjem (vsebnost Cu + Ni = 1,2 % × 500)



Slika 18

Eksperimentalni ciklusi mehkega žarjenja nizkolegiranih jekel za poboljšanje



Slika 17

Mikrostruktura jekla CQ 45 po žarjenju s hitrim ohlajevanjem (vsebnost Cu + Ni = 1,2 % × 500)

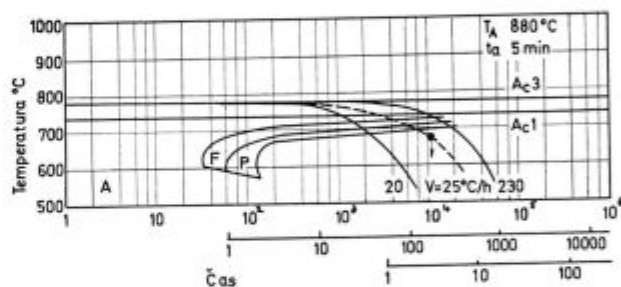
trdoto jekla, s čim višjo stopnjo sferoidiziranega cementita.

S poizkusnimi žarjenji v laboratorijski programski peči smo obdelali vsa nizkolegirana jekla za poboljšanje, legirana s Cr, Cr-V, Cr-Mo, CrNiMo in CrSi, ki jih navaja DIN 17200 (JUS C0.B9.021) ter na podlagi dobljenih rezultatov sestavili **enoten ciklus** za mehko žarjenje nizkolegiranih jekel za poboljšanje v industrijskih žarilnih pečeh.

Vrednosti za kritične točke premene ter TTT diagrame smo vzeli iz tujih katalogov<sup>5</sup> ter iz rezultatov ustreznih preiskav na Raziskovalnem oddelku Zelezarne Jesenice. Na osnovi teh podatkov smo sestavili dva osnovna ciklusa za programsko žarjenje v laboratorijski peči. Oba ciklusa sta v koordinatah temperatura — čas prikazana na sliki 18.

Hitrost ohlajevanja iz temperature avstenitizacije je enaka pri obeh ciklikih in znaša v kritičnem

območju 26° C/uro. Pri takšni hitrosti ohlajevanja bo pri vseh obravnavanih jeklih premena končana v visoko perlitnem območju na položnem delu krivulje na TTT diagramu, kar je tudi razvidno iz primera na sliki 19.



Slika 19

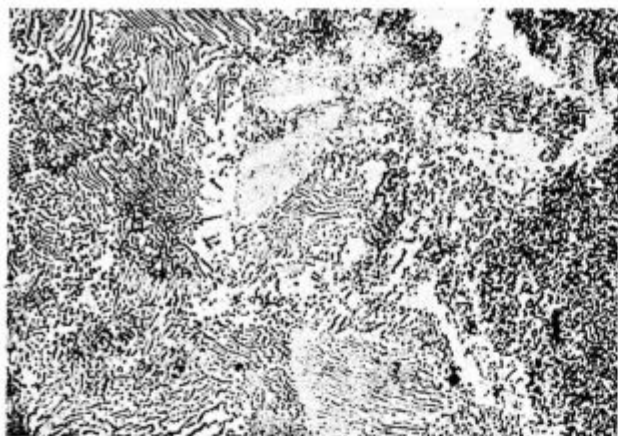
Kontinuirni TTT diagram za Cr-V jeklo za poboljšanje

Iz kontinuirnih TTT diagramov je tudi razvidno, da je temperatura ohlajevanja  $T_H$  650° C, kjer se lahko prične s hitrim ohlajevanjem.

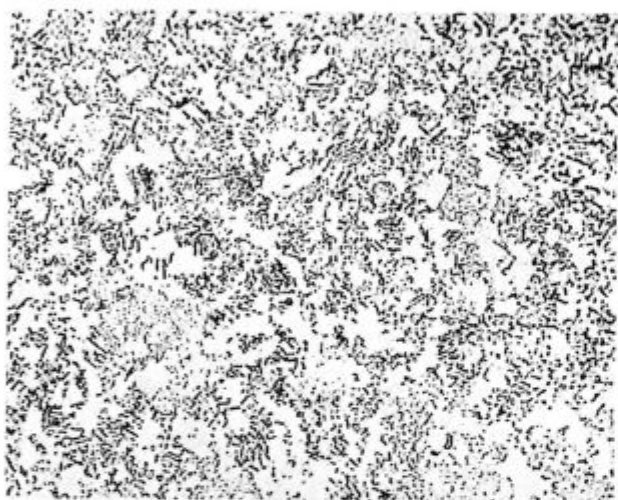
Dosežena trdota (HB kp/mm<sup>2</sup>) po mehkem žarjenju ter delež koaguliranega cementita v strukturi jekla je prikazan v tabeli 1, mikrostruktura jekel pa na slikah 20 in 21.

*Tabela 1 — Rezultati mehkega žarenja nekaterih nizkolegiranih jekel za poboljšanje po eksperimentalnih ciklikih*

vrsta jekla	vročje valj. stanje HB	HB HB	% Sf. % Sf.	HB HB	% Sf. % Sf.
Č 4130	228	158	50 %	156	50 %
Č 4830	316	185	80 %	170	95 %
Č 4730	209	152	100 %	159	100 %
Č 4731	267	180	80 %	168	100 %
Č 4732	281	196	80 %	164	100 %
Č 5430	302	226	50 %	179	100 %



Slika 20  
Mikrostruktura jekla C4731 po mehkem žarenju (eksp. program 13 x 500)



Slika 21  
Mikrostruktura jekla C4731 po mehkem žarenju (eksp. program 14 x 500)

#### 4. APLIKATIVNO DELO

Postopek mehkega žarjenja s kontinuirnim ohlajanjem smo uvedli v kontinuirnih pečeh ter v stacionarnih žarilnih pečeh. Pri definiranju posameznih faz žarjenja je bilo potrebno izkoristiti možnosti, ki izhajajo iz same konstrukcije posameznih tipov industrijskih pečeh. Rešitev problema osvajanja postopka mehkega žarjenja s kontinuirnim ohlajanjem je za posamezne vrste industrijskih pečeh naslednja:

##### 4.1 Kontinuirna žarilna peč

Kontinuirna žarilna peč nam služi za žarjenje paličnih jekel in žice v manjših kolobarjih. Zaradi svoje konstrukcije in funkcionalnosti je primerna za najbolj zahtevna žarjenja.

Zunanji videz peči je prikazan na sliki 22. Oblika peči je razvidna iz sheme na sliki 23.

Žarjenje se vrši v zaščitni atmosferi NX in RX plina v temperaturnem območju 680—930° C.

Peč ogrevamo z žarilnimi cevmi z notranjim izgorevanjem. Ti ogrevalni elementi so montirani nad pogonskimi valjčnicami in pod njimi. Število teh ogrevalnih elementov je v posameznih conah različno, ker je odvisno od funkcije posameznih con. Kot gorivo se uporablja kurilno olje ali nafta, kot pilot plin pa služi plin butan — propan. V žarilne cevi II. do VI. cone se za pospešeno ohlajanje lahko dovaja tudi mrzel zrak. Ker so posamezne cone med seboj ločene z obzidanimi pregradami, so lahko med njimi večje temperaturne razlike. Za izenačevanje temperature v posameznih conah služijo ventilatorji. Vstopna in izstopna veža sta opremljeni s premičnimi pokrovi ter z železno zaveso za tesnjenje peči. Na obeh koncih vež je predvidena še zračna zavesa. Višino temperature kontroliramo na vsaki coni posebej. Gorivo se v žarilne peči dozira avtomatično.

Kapaciteta ogrevanja od 0 — 730° C je v I. coni 2200 kg/uro, v I. in II. coni pa 2400 kg/uro.

Kapaciteta ohlajanja od temperature 870° na 760° v II. — VI. coni znaša 2200 kg/uro.

Vložek se pomika skozi peč po transportnih valjčnicah. Prva in druga polovica peči imata poseben pogon, seveda pa ima cela peč lahko enako hitrost, ki znaša od 0,7 — 7,3 m/uro.

##### 4.1.12 Rezultati žarjenja

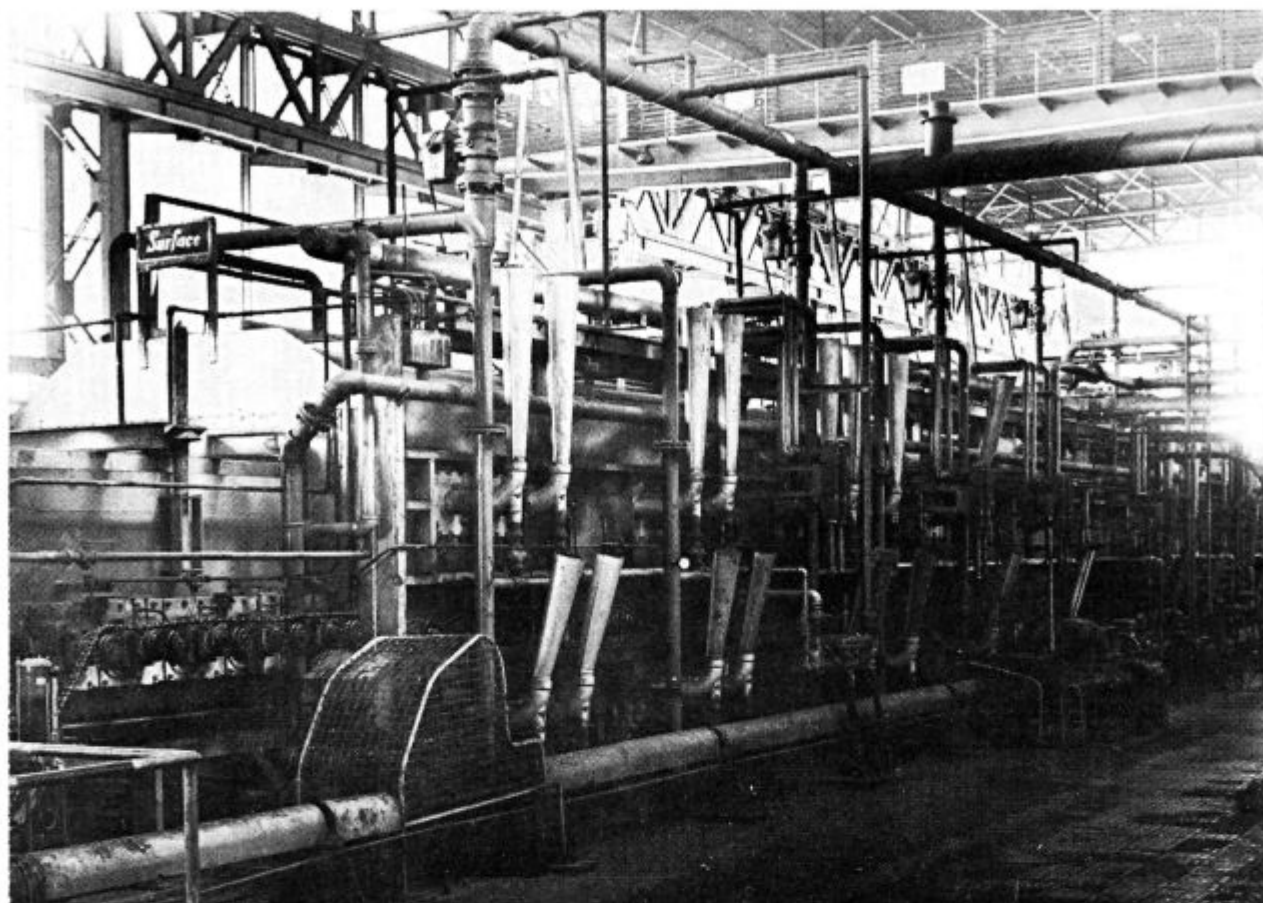
Za obravnavani postopek mehkega žarjenja s kontinuirnim ohlajanjem je opisana kontinuirna peč posebno primerna. Programi žarjenja so definirani z višino temperature po posameznih conah ter hitrostjo pomika vložka skozi peč. Pri danih parametrih žarjenja je dosežena storilnost odvisna od naložitve vložka (kg/m), kar je zopet odvisno od oblike (dimenzija, ravnost) vložka.

Pri mehkem žarjenju legiranih jekel za poboljšanje dosežemo maksimalno storilnost peči 2400 kg na uro pri dovoljeni maksimalni obremenitvi valjčnic 1800 kg/m in hitrosti pomika skozi peč 2 m/uro. Temperaturni režim v peči pri mehkem žarjenju nekaterih CrV, CrMo jekel za poboljšanje je prikazan na sliki 24.

Pri sferoidizacijskem žarjenju nizko legiranih orodnih jekel dosežemo nižje storilnosti, okoli 1800 kg/uro, kar je posledica manjših hitrosti pomika jekla skozi peč in nižje dovoljene obremenitve peči. Temperaturni režim v peči za sferoidizacijsko žarjenje orodnih jekel je prikazan na sliki 25.

Uspešnost sferoidizacijskega žarjenja orodnih jekel po prikazanem ciklusu ilustrirajo podatki, navedeni v tabeli 2.

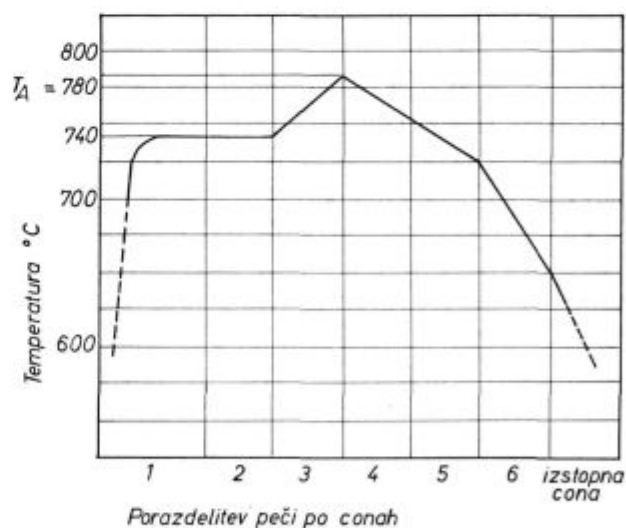




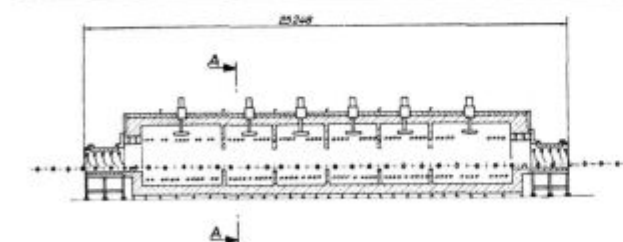
Slika 22  
Sestronska kontinuirna žarilna peč

Tabela 2 — Rezultati sferoidizacijskega žarjenja nizkolegiranih orodnih jekel

vrsta jekla	dim. Ø mm	trdota HB po žarjenju	stopnja % sferoid.	velikost karbidov (skala Düergarten)
Č 4146	55	186—189	100	2.05.1
Č 4146	16	179—182	100	2.05.2
Č 6841	12	182—186	100	2.05.2
Č 6841	15	179—182	100	2.05.2

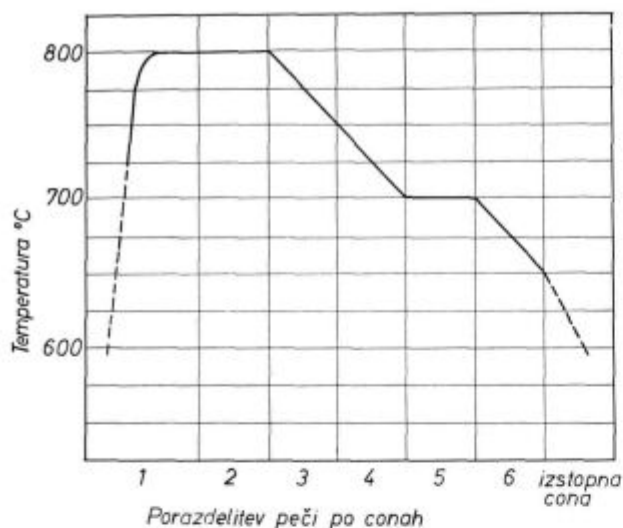


Slika 24  
Ciklus žarjenja v kontinuirni žarilni peči



Slika 23  
Shema 6-conske kontinuirne žarilne peči

Uspešnost sferoidizacijskega žarjenja po postopku s kontinuirnim ohlajevanjem v kontinuirni žarilni peči najlepše ilustrira primer sferoidizacijskega žarjenja jekla za kvalitetne vijake, vrste 41 Cr 4 (DIN 1654). Pogoji žarjenja so naslednji:



Slika 25

### Temperaturni režim za sferoidizacijsko žarjenje orodnih jekel

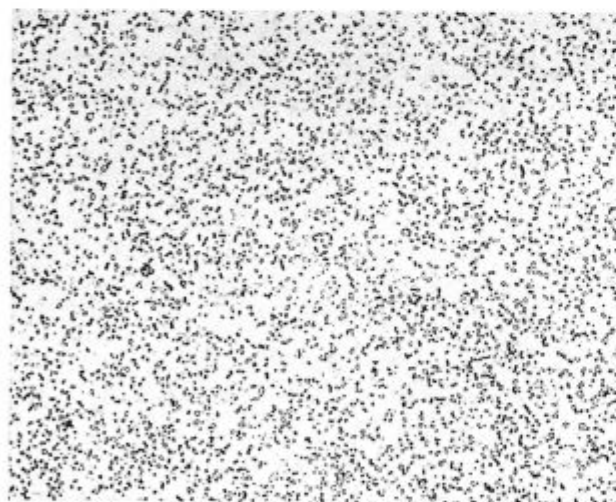
a) temperaturni režim v peči:

cona I	740° C
cona II	760° C
cona III	760° C
cona IV	750° C
cona V	720° C
cona VI	650° C

b) hitrost pomika 1,8 m/uro

c) atmosfera: zaščitni plin NX

Efekt sferoidizacijskega žarjenja je razviden iz posnetka mikrostrukture žarjenega jekla na sliki 26.



Slika 26

Mikrostruktura jekla 41 Cr 4 po sferoidizacijskem žarjenju  
× 500

## 4.2 Stacionarne žarilne peči

Vložek v stacionarnih žarilnih pečeh ima obliko velikega »zaboja«, ki se ogreva v obravnavanih

stacionarnih pečeh z električnim tokom z vseh strani preko uporovnih grelnih elementov. Normalno se registrirajo temperature oboka in dna peči. Zaradi velike višine in širine vložka pa obstaja večja temperaturna razlika med površino in sredino vložka, ki jo je potrebno pri postopku mehkega žarjenja s kontinuirnim ohlajevanjem upoštevati. V vseh stacionarnih žarilnih pečeh, kjer smo uvedli postopek mehkega žarjenja s kontinuirnim ohlajanjem, smo zato vgradili še **dodatne termoelemente**, ki so vloženi v sredino vložka in registrirajo temperaturo na tem mestu. Prav tako smo v fazi eksperimentov merili temperaturo na zgornji površini vložka. Ze iz eksperimentalnega dela je razvidno, da lahko za večino nizkolegiranih jekel za poboljšanje sestavimo enoten režim mehkega žarjenja po postopku s kontinuirnim ohlajanjem. Izjema so le manganova in krom-nikelj-molibdenova jekla. V vseh obravnavanih stacionarnih pečeh je tako mogoče postaviti enoten režim mehkega žarjenja nizkolegiranih jekel za poboljšanje, ki se zaradi razlik v konstrukciji posameznih peči razlikujejo le v načinu ohlajevanja iz temperature avstenitizacije. Tak unificiran režim mehkega žarjenja nam v vsakem slučaju omogoča **polne naložitve peči**, kar je za dosego visoke storilnosti žarilnih agregatov zelo pomembno. **Osnovni parameter žarjenja, ki regulira cikel**, pa je **v vseh primerih temperatura v sredini vložka**. Pogoji mehkega žarjenja nizko legiranih jekel za poboljšanje v stacionarnih pečeh so naslednji:

V periodi ogrevanja se temperatura nastavi na 800° C. Ko peč doseže to temperaturo, se le-ta preklopi na temperaturo 780° C. Pregrevanje na tej temperaturi traja toliko časa, dokler sredina vložka ne doseže 750° C. Po eni uri se peč izklopi. Ohlajanje je končano v momentu, ko sredina vložka doseže temperaturo 650° C.

### 4.2.1 Tunelska žarilna peč

Tunelska žarilna peč služi za mehko žarjenje debele pločevine, gredic, toplo valjanih trakov v svitkih in večjih kolobarjev toplo valjane žice. Zunanji videz te peči je prikazan na sliki 27, presek peči z vsemi glavnimi elementi, ki jo sestavljajo, pa je shematsko prikazan na sliki 28.

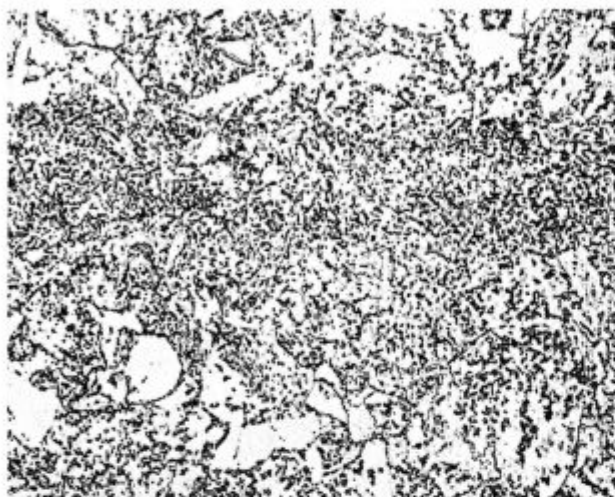
Priključna moč peči znaša 950 kW — vložek pri enkratni naložitvi 40—50 ton. Celoten cikel mehkega žarjenja po postopku s kontinuirnim ohlajanjem je prikazan na diagramu na sliki 29.

Ostali parametri cikla so bili naslednji:

- vrsta jekla Č 4732, Č 4730, Č 3230;
- teža vložka 43320 kg;
- trajanje ciklusa 38 ur;
- dosežena storilnost peči 1140 kg/uro;
- specifična poraba energije 182 kW/tono.



Dosežena nizka hitrost ohlajevanja zagotavlja visoko končno temperaturo transformacije. Mehanske lastnosti mehko žarjenih jekel za poboljšanje, žarjenih po prikazanem ciklusu, v vseh primerih zadovoljujejo. Dosežena trdota se giblje pod HB 200 kp/mm<sup>2</sup>. Mikrostruktura jekla po žarjenju kaže visoko stopnjo sferoidizacije, kar je razvidno iz slike 30.



Slika 30

Mikrostruktura jekla Č 4730 po mehkem žarjenju v tunelski peči × 500

#### 4.2.2 Zvonaste žarilne peči

V zvonastih žarilnih pečeh se žarijo paketi tanke in srednje pločevine ter palično jeklo, gredice in lamele. Zunanji videz zvonaste žarilne peči je prikazan na sliki 31.

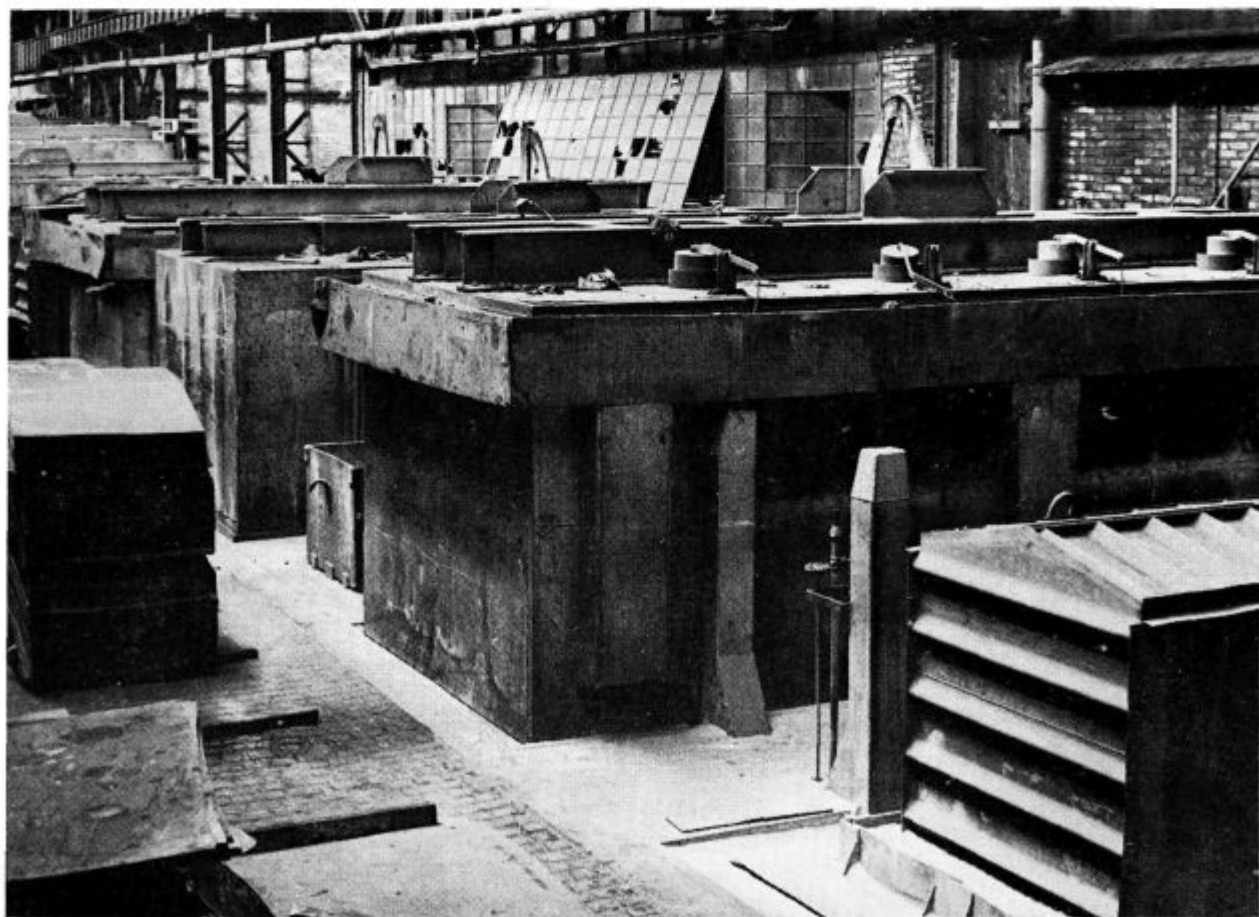
Zvonasto žarilno peč sestavljajo naslednji elementi:

Trije podstavki, na katerih je naložen vložek; žarilni zvon, pod katerim se vložek ogreva; hladilni zvon, pod katerim se vložek ohlaja.

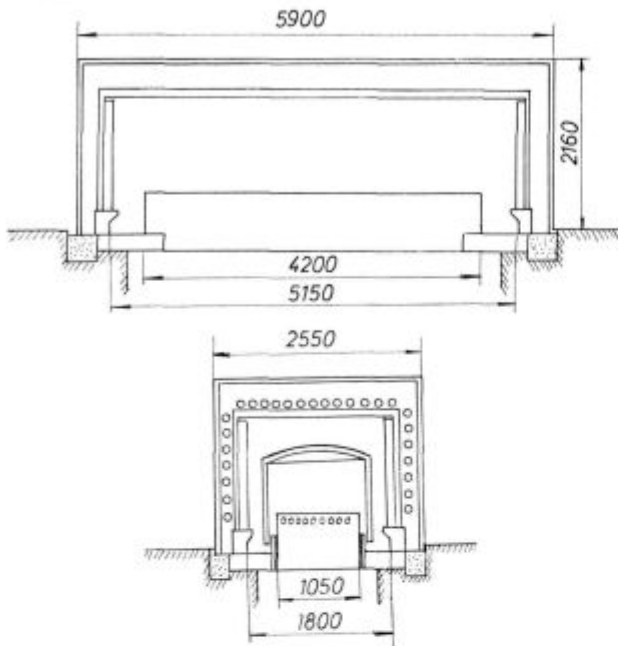
Uporovni in grelni elementi so vgrajeni v podstavke, ter stene in strop žarilnega zvona. Hladilni zvon je obzidan s šamotno opeko, za ohlajevanje pa služi 6 odprtin na stropu, ki se odpirajo in zapirajo s čepi. Priključna moč peči znaša 350 kW, optimalni vložek pri enkratnem zalaganju pa je 15 ton.

Mehko žarjenje po postopku s kontinuirnim ohlajevanjem se v zvonastih pečeh vrši na naslednji način: Vložek se ogreva na zahtevano temperaturo avstenitizacije pod žarilnim zvonom. Ko sredina vložka doseže zahtevano temperaturo, se prične z ohlajanjem na ta način, da se žarilni zvon zamenja s hladilnim zvonom. Zamenjava žarilnega zvona s hladilnimi zvonovi se izvrši s pomočjo

Slika 31 Zvonasta žarilna peč

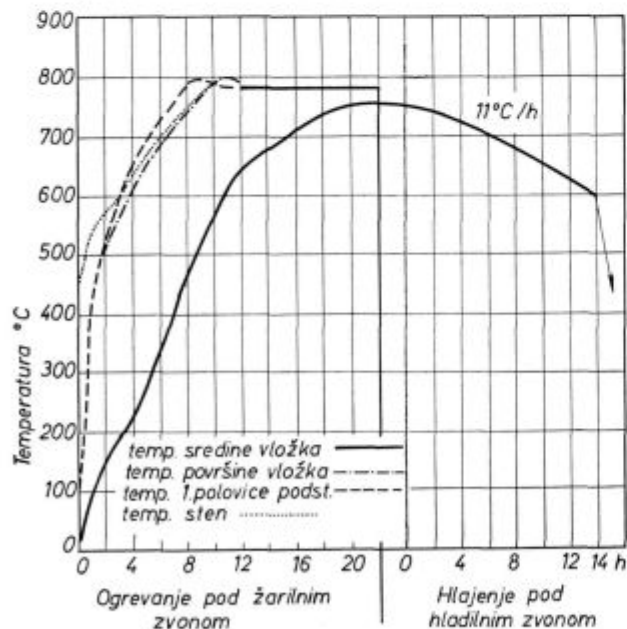


dveh žerjavov in je končana v ca. 3 minutah. Po zamenjavi se žarilni zvon postavi na podstavek z mrazim vložkom, ker se zopet prične z ogrevanjem. Na tretjem prostem podstavku se že žarjeni vložek razklada in pripravlja nov vložek za mehko žarjenje. Shema zvonaste žarilne peči je prikazana na sl. 32.



Slika 32  
Shema zvonaste žarilne peči

Mehko žarjenje po postopku s kontinuirnim ohlajanjem poteka v zvonastih pečeh neprekinjeno, brez mrtvih časov, kar omogoča maksimalno izkoriščanje peči. Storitnost peči je torej odvisna le od

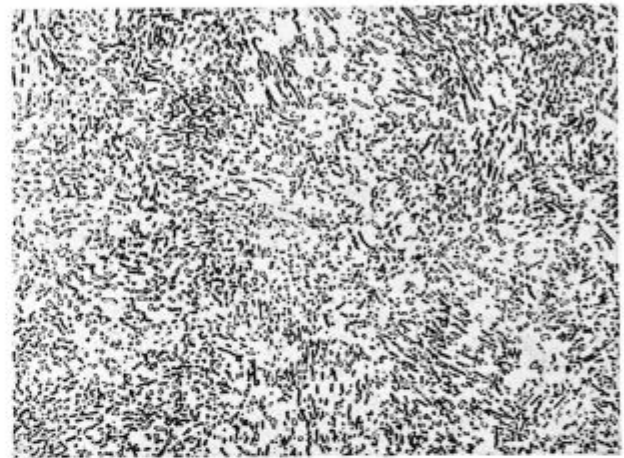


Slika 33  
Ciklus mehkega žarjenja po postopku s kontinuirnim ohlajanjem v zvonastih pečeh

časa ogrevanja vložka, saj je ohlajanje, ki se vrši v drugem podstavku istočasno, končano nekaj ur prej. Celoten cikel mehkega žarjenja v zvonastih pečeh ilustriramo s primerom mehkega žarjenja jekla, vrste Č 4732 in Č 3734 v palicah, v diagramu na sliki 33.

Teža vložka je znašala 13410 kg  
doba ogrevanja je bila 22 ur  
dosežena storilnost pa 510 kg/uro.  
Hitrost ohlajanja je bila 11° C/uro,  
vložek se je ohlajal do temperature 600° C  
čas ohlajanja je trajal 14 ur.

Trdota jekla po žarjenju (poprečje 10 meritev) = Č 4732 — HB 162 kp/mm<sup>2</sup>, Č 4734 — HB 176 kp/mm<sup>2</sup>. Visoka stopnja sferoidizacije cementita po mehkem žarjenju je prikazana na sliki 34, kar potrjuje uspešnost uporabljenega postopka.



Slika 34  
Mikrostruktura jekla Č 4732 po mehkem žarjenju × 500

## 5. ZAKLJUČKI

Za hladno predelavo orodnih jekel ter jekel za poboljšanje, kjer se zahteva visoka plastičnost ali dobra obdelovalnost, je s toplotno obdelavo vroče valjanega jekla potrebno doseči nizko trdoto ter mikrostrukturo jekla s krogličasto obliko cementita v feritni osnovi.

Hitre metode mehkega žarjenja jekel, ki vodijo k nizki trdoti in željeni obliki mikrostrukture jekel pri visoki storilnosti industrijskih žarilnih peči, so osnovane na postopku s kontinuirnim ohlajanjem. Pri tem postopku se jeklo za krajši čas ogreje nad kritično temperaturo  $A_c1$  in nato počasi ohlaja.

Pogoji žarjenja po postopku s kontinuirnim ohlajanjem so odvisni od vrste jekla, ki ga žarimo, to je vrednosti kritičnih premenskih točk ter oblike TTT diagrama za določeno jeklo.

Različne kvalitete jekel znotraj obravnavanih kvalitetnih grup imajo toliko skupnega, da je mogoče sestaviti za posamezne kvalitetne grupe jekel enotne cikle žarjenja.

Ker poteka postopek žarjenja s kontinuirnim ohlajanjem na različnih temperaturnih nivojih, so za ta postopek najbolj primerne kontinuirne večconske žarilne peči, v katerih je mogoče sferoidizacijsko žariti jekla po najbolj zahtevnih programih.

V stacionarnih pečeh se lahko kontrolirano vodi le enostaven režim mehkega žarjenja s kontinuirnim ohlajanjem na osnovi temperature, merjene v sredini vložka. Zaželjeno optimalno hitrost ohlajanja dosežemo s pravilnim izkoriščanjem konstrukcijskih elementov, ki sestavljajo stacionarne peči.

#### Literatura

1. Payson P. *The Metallurgy of Tool Steels* John Wiley Co Sons. in New York 1962

2. Dr. ing. Labonek F. »Podminky pro vznik globulárního perlity při žihání nadeutektoidních ocelí, zvláště oceli pro voliva ložiska« *Hutnické listy* číslo 3 rok 1965 str 190—194
3. Dr. ing. Labonek F. »Zpřesnění způsobu žihání oceli pro volivá ložiska s přihlédnutím k obsahu Ni, Cu a Mn« *Hutnické listy* číslo 7 rok 1961 str 471—475
4. Rao F. S. »The spheroidisation of Steel« *Machinery and Production Engineering* March 2 1966 str 483—486
5. Wever F., Rose A. *Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle* Verlag Stahleisen M. B. H. Düsseldorf 1954/56
6. Light R. J. Significance of Time — Temperature — Atmosphere Relations in Continuous Annealing *Iron and Steel Engineer*, April 1969, str. 62—71
7. Tehnički priručnik *Železarne Jesenice*. Progres — Novi Sad 1961, str. 96—115

### ZUSAMMENFASSUNG

Für die niedriglegierten Werkzeug- und Vergütungsstähle und Stähle für die kalt zu formende Schrauben wurde ein Weichglühverfahren in Durchlauf und stationären Industrieglühöfen mit kontinuierlicher Abkühlung entwickelt. Die Vorteile dieses Verfahrens vor dem isothermen Glühen sind in dem, dass man die verlangte Härte des Stahles und einen hohen Grad der Koagulierung des Zementites beim besseren Vermischen der Gefügebestandteile in kürzerer Zeit erreicht. Die Stahlqualität wird dementsprechend verbessert und die Leistung der Industrieglühöfen wird erhöht.

Der optimale Glühungsverlauf für die einzelnen Stahlgruppen wurde durch das Glühen der Proben in einem programmierten Laborofen festgestellt, mit der Voraussetzung, dass die Werkzeugstähle und die Stähle für kalt zu formende Schrauben vollkommen weich gegläht, die Vergütungsstähle aber auf eine maximal erlaubte Härte und mit bis zum höchsten Mass koaguliertem Zementit gegläht sein müssen. Besondere Aufmerksamkeit wurde dem Vereinigen der Glühverfahren der einzelnen Stahl-

gruppen gewidmet, was eine volle Besetzung der Öfen beim jeden Glühen ermöglichen sollte.

Bei der Einführung des Weichglühverfahrens mit kontinuierlicher Abkühlung in den Industrieöfen ist es nötig in einzelnen Phasen des Zykluses die Möglichkeiten welche die Ofenkonstruktion bietet, auszunutzen.

Das anspruchvolle Sferoidisationsglühen wurde im kontinuierlichen Glühöfen ausgeführt in welchen das Glühverfahren mit kontinuierlicher Abkühlung keine Probleme verursacht, wenn die Glühparameter Zeit — Temperatur gegeben sind. Die stationären Glühöfen müssen zuerst mit allen nötigen Elementen für die Kühlung komplettiert werden, soeben wurden noch zusätzliche Thermolemente eingebaut, welche die Temperatur im inneren des Einsatzes messen.

Die Grundparameter welche den Glühzyklus führen sind die Temperatur in der Mitte des Einsatzes und die Abkühlungsgeschwindigkeit. Sie liess sich in den letzt genannten Öfen ohne weiteres regeln.

### SUMMARY

A method of annealing with continuous cooling was introduced for annealing low-carbon tool steels, steels for quality screws, and low-alloyed steels for tempering in industrial annealing furnaces, continuous and stationery ones. Advantage of this method over the isothermal annealing is in obtaining the demanded hardness of steel and a high degree of cementite coagulation at better separation of structure components in a shorter time. Quality of steel is thus improved and capacity of industrial annealing furnaces is increased.

The optimal conditions for annealing different groups of steels were studied by annealing steel samples in a laboratory programmed furnace. Demands were taken in account that the tool steels and the steels for quality screws must be spheroidisedly annealed, and the steels for tempering annealed to the maximal allowed hardness at simultaneous maximal amount of coagulated cementite. A special attention was given also to combinations of annealing conditions for individual steel groups what

should enable the full exploitation of the furnace at each annealing.

Introducing the method of annealing with continuous cooling into industrial annealing furnaces demands to make use of the possibilities in individual phases of the cycle, due to the design of different discussed types of industrial annealing furnaces. The most exacting spheroidised annealing were directed into the continuous annealing furnace where introduction of the annealing with continuous cooling does not present any problem if parameters of annealing — the temperature — time — are given in different phases. At stationary annealing furnaces, the furnaces had to be completed at first with all the belonging elements for cooling, and additional thermocouples inserted in the center of the charge had to be built in. The basic parameters of annealing which control the cycle are the temperature in the center of the charge and the cooling rate which also did not cause problems in the discussed furnaces.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для мягкого накаливания низкоуглеродистых инструментальных сталей, сталей для качественных винтов а также низколегированных сталей для облагораживания в непрерывных и стационарных промышленных печах для накаливания, введен способ отжига с непрерывным охлаждением. Преимущество этого способа в сравнении с изотермическим отжигом состоит в том, что можно получить требуемую твердость стали и высокую коагуляцию цементита при лучшем размещении структурных компонент в более коротком времени. Улучшается качество стали и эффективность промышленной печи.

Оптимальный режим отжига для отдельных групп сталей был изучен отжигом образцов стали в лабораторной программной печи. Взято во внимание требование, что инструментальные стали и стали для качественных винтов должны быть термически обработаны на зернистый перлит а стали для облагораживания на максимальную твердость с чем высшей степень коагулированного цементита.

Особое внимание посвящено объединению режимов отжига при отдельных группах стали что разрешает заполнить полностью печ. При введении этого способа мягкого отжига необходимо при отдельных фазах цикла использовать возможности которые происходят из конструкции типов печей. Наиболее требовательный отжиг на зернистый перлит был выполнен в непрерывной печи в которой введение отжига с непрерывным охлаждением не дало препятствий, при условии если существуют параметры для отжига — темп. и время для отдельных фаз.

При стационарных печах нужно было сперва оборудовать печи с всеми необходимыми элементами для охлаждения и вставить термоземента которые вставлены в шихтовой материал. Основной параметр отжига суть тем.-а в середины шихтового материала и быстрота охлаждения; в печах которые были употреблены оказалось что не было никаких проблем.