

Izdelava in praktična uporaba TTT diagramov

Opisan je dilatometer DITIRC, ki služi za izdelavo izotermnih in kontinuirnih TTT diagramov. Poudarjene so predvsem različne možnosti uporabe te naprave. Navedeni so načini doseganja različnih ohlajevalnih hitrosti, ki so potrebne za izdelavo TTT diagramov. Omenjene so pomožne metode za dopolnitev premenskih krivulj nekaterih jekel. Razloženo je vrednotenje diagramov čas—temperatura—dilatacija. Opisane so fазne premene pri avstenitizaciji in pri ohlajanju avstenitne faze. Na praktičnih primerih je prikazan vpliv premen na obliko dilatometrskih krivulj pri kontinuirnem ohlajanju in izotermnem držanju. Naveden je postopek za praktično uporabo TTT diagramov.

UVOD

Mnogo zlitin ima pri visokih temperaturah enofazno strukturo, ki se lahko zadrži v metastabilnem stanju do dosti nižjih temperatur, kot jih predvideva ravnotežni diagram. Iz te metastabilne faze se tvorijo strukturne faze z dokaj različnimi lastnostmi od onih, ki jih sečamo pri fazah, izoblikovanih v termično ravnotežnih pogojih. Za uporabnike takih zlitin so zanimive transformacijske krivulje, ki kažejo potek faznih premen bodisi v izotermnih pogojih ali pa pri kontinuirnem ohlajanju. Če vrišemo transformacijske krivulje v pravokotni koordinatni sistem, pri katerem nanašamo na abscisno os log t , na ordinatno pa T , dobimo TTT diagram.

Do sedaj so se TTT diagrami uporabljali največ za jekla, zato se bomo zadržali na teh zlitinah. Pri raziskavah faznih transformacij merimo fizikalne lastnosti materiala, ki so odvisne od fazne sestave: mikroskopski videz, specifični električni upor, specifično toploto, magnetne lastnosti, kristalografske značilnosti, specifično prostornino in podobno. Nobeden izmed teh načinov ne nudi popolne slike o faznih transformacijah, kljub temu pa lahko rečemo, da se z dilatometrijo (merjenjem raztezков) dobi na najenostavnejši način največ podatkov.

Opis in uporabnost dilatometra DITIRC

V železarni Ravne uporabljamo za izdelavo TTT diagramov dilatometer DITIRC, ki ga je razvila francoska firma ADAMEL. Vidimo ga na sliki 1. Aparat je sestavljen iz dveh ločenih enot:

— podstavka, na katerem so nameščeni: naprava za merjenje, peči in pomožni deli, ki omogočajo

izvedbo različnih toplotnih ciklov in atmosfer, v katerih držimo preizkušance,

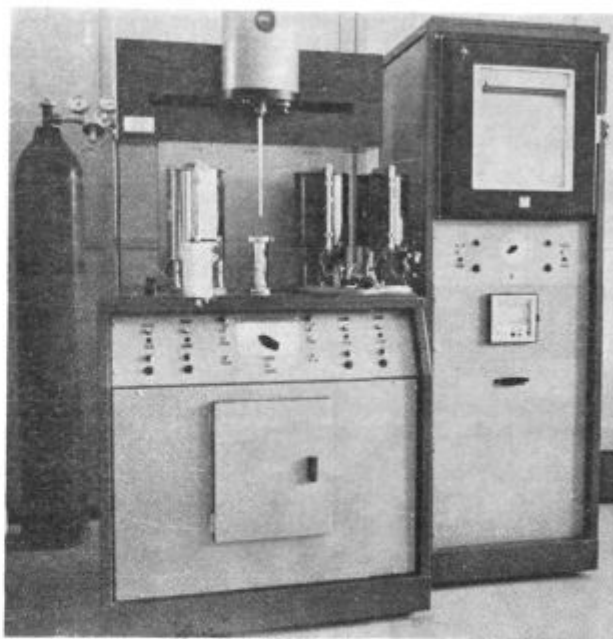
— registratorske omare, v katero so vgrajeni: registrator, elektronska naprava za napajanje in sprejem signalov iz sistema za merjenje podaljškov in elektromehanski sistem za avtomatsko dviganje in spuščanje pisarja.

a) Naprava za merjenje.

Preizkušanec ima obliko cevke; njegova dolžina je 30 mm, zunanji premer 4 mm. Nameščen je v kremenčevi cevki, ki je na spodnji strani zaprta. Dimenzijske spremembe se prenašajo preko kremenčeve palice, ki hkrati služi za izolacijo termoelementa; le-tega privarimo direktno na preizkušanec. Sprememba dolžine preizkušanca premakne jedro linearnega diferencialnega transformatorja, zaradi česar se inducira v sekundarnih tuljavah spremenjena napetost.

b) Naprava za prenos.

Konec cevke z vzorcem lahko uvedemo v katerokoli peč ali posodo s sredstvom za ohlajanje. Poleg tega lahko zaščitimo to cevko z dodatnimi cevmi, s čemer dosežemo manjšo ohlajevalno hitrost. Prenos izvedemo s kombinacijo dveh translatornih gibanj: vertikalnega s premikanjem gibljivega podstavka in horizontalnega s premikanjem



Slika 1
Dilatometer DITIRC

plošče, na kateri je pritrjena naprava za merjenje. Maksimalen čas prenosa je okrog štiri sekunde. Sistem blažilcev zmanjšuje sunke pri prenosu.

c) Peči in ostali deli na podstavku.

Dilatometer ima tri peči: ena služi za avstenitizacijo, ostali dve pa za izvedbo izotermnih kopeli. Za izotermno kopel uporabljamo bodisi primerno sol ali eutektik (npr. Pb/Bi). Peči so Chevenard-Joumierove vrste (regulacija z dilatacijsko žico). Pri prvi je možno regulirano segrevanje s stalno hitrostjo in izotermno držanje, pri ostalih dveh pa samo izotermno držanje s točnostjo $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

Na srednji nosilec lahko postavimo Dewarjevo posodo ali šobo za hlajenje s pihanjem zraka. Na gibljivem podstavku so posebne šobe za odpihovanje korozivnih par, ki izhajajo iz izotermnih kopeli. Sistem cevi in zaklopk omogoča skupaj z rotacijsko vakuumsko črpalko doseganje vakuuma v cevki z vzorcem in dodatno ohlajanje z inertnim plinom.

d) Registratorska omara

Registrator je kompenzacijski in omogoča risanje takihle diagramov:

— dilatacije Δl (na osi x) v odvisnosti od temperature $T\Delta l$ (na osi y)

— dilatacije Δl (na osi x) v odvisnosti od časa t, ki ga registriramo z odvijanjem diagramskega papirja s konstantnimi hitrostmi (na osi y).

V prvem primeru lahko brez težav beležimo Δl na osi y, T pa na osi x. Na ta način v drugem primeru registriramo temperaturo v odvisnosti od časa, kar je posebno važno za eksperimentalno določanje ohlajevalnih krivulj na različnih vzorcih.

V vsakem primeru lahko s pomočjo elektromehanskega sistema za dviganje in spuščanje pisača v enakomernih časovnih presledkih črtkamo registrirno krivuljo; število črtic je sorazmerno času. Časovne intervale lahko izberemo na deset različnih načinov.

Posebna elektronska naprava napaja primarne ovoje linearnega diferencialnega transformatorja s sinusnim tokom, katerega frekvenca je 5 kHz, sprejete signale iz sekundarnih ovojev pa preoblikuje v enosmerno napetost. Le-ta raste sorazmerno z raztezanjem dilatometrijskega vzorca, njeno začetno vrednost pa lahko naravnamo z gumbom.

Pri merjenju temperature ni posebnih težav, ker je registrator prirejen za merjenje enosmernih napetosti iste velikosti, kot jih daje termoelement Pt/Pt-Rh (10 %); upoštevati pa je treba, da je napetost termoelementa odvisna od absolutnih temperatur vročega in hladnega spoja, zaradi česar je treba držati hladni spoj med eksperimentiranjem pri določeni temperaturi.

Pri merjenju linearnega temperaturnega raztegnostnega koeficienta na diagramu odčitana vrednost po deljenju z ojačevalnim faktorjem še

vedno ne ustreza pravi vrednosti. Če segrejemo dilatometrijski preizkušane skupaj s spodnjim delom kremenčeve cevke in palice za ΔT , se preizkušanece raztegne za Δl , oni del kremenčeve cevke, ki obdaja preizkušanece, pa za Δl_{SiO_2} . Raztezanje višjih delov kremenčeve cevke in palice zaradi enakih temperatur ne vpliva na rezultat meritve. Preizkušanece dvigne palico samo za $\Delta l' = \Delta l - \Delta l_{\text{SiO}_2}$. To pomeni, da je treba tudi pri določanju linearnega temperaturnega raztegnostnega koeficienta iz diagrama izračunani vrednosti dodati še raztegnostni koeficient cevke ($= 0,55 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$).

$$\alpha = \alpha' + \alpha_{\text{SiO}_2} \quad (1)$$

DOLOČANJE OHLAJEVALNIH KRIVULJ PRI EKSPERIMENTIH NA DILATOMETRU DITIRC

Važen del kontinuirnih TTT diagramov so ohlajevalne krivulje in njihov časovni odvod — ohlajevalna hitrost. Čim več različnih ohlajevalnih hitrosti lahko dosežemo, tem natančneje lahko narišemo TTT diagram. Pri dilatometru DITIRC lahko to dosežemo na tri načine:

a) z regulacijo atmosfere, v kateri držimo preizkušanece

b) z uporabo zaščitnih cevi

c) z izbiro sredstva, v katerem ohlajamo cevko z vzorcem.

Kombinacija vseh teh načinov nam da množico ohlajevalnih krivulj, katerim pripadajo ohlajevalne hitrosti med 150°C/h in 150°C/s .

a) Regulacija atmosfere, v kateri držimo preizkušanece

Vzorec obkroža v kremenčevi cevki tanek sloj plina. Debelina te plasti je ocenjena na 0,1 mm, a kljub temu vpliva na ohlajevalno hitrost zaradi nizke toplotne prevodnosti. S pomočjo kinetične teorije plinov ugotovimo, da se toplotna prevodnost za določeni plin ne menja, dokler ni pritisk plina tako nizek, da je prosta pot molekul približno enaka širini zračne reže; v našem primeru je ta pritisk okrog 1 tor. Toplotna prevodnost se pri nižjih pritiskih manjša linearno s padcem pritiska, v vsakem primeru pa je odvisna od kvalitete plina.

b) Uporaba zaščitnih cevi

Za zmanjšanje hitrosti ohlajanja pri ohlajevanju na zraku lahko uporabljamo zaščitne cevi z različnimi debelinami stene.

c) Izbira sredstva, v katerem ohlajamo cevko z vzorcem

Cevko z vzorcem lahko ohlajamo v peči za avstenitizacijo bodisi s prekinitvijo električnega toka, bodisi po urnem mehanizmu, v šobi za pihanje zraka, v navadni posodi z različnimi sredstvi

za ohlajanje (z vodo, oljem, raztopinami kislin, baz in soli) in v Dewarjevi posodi z različnimi kriogenimi sredstvi (tekočim dušikom in podobno).

Pri ohlajanju z različnimi tekočinami je ohlajevalna hitrost odvisna od fizikalnih lastnosti tekočine: vrelišča, specifične izparilne toplote, toplotne prevodnosti in viskoznosti; pri ohlajanju s pihanjem zraka je ohlajevalna hitrost odvisna od hitrosti zračnega curka.

Ohlajevalna hitrost navadno ni konstantna po celem temperaturnem intervalu; zaradi tega je ugodneje navesti povprečno ohlajevalno hitrost med dvema različnima temperaturama:

$$v = \frac{T_2 - T_1}{t_1 - t_2}$$

Za nekatere vrste jekel maksimalne dosežene hitrosti ohlajanja z dilatometrom DITIRC ne zadoščajo (npr. za podeltektoidna ogljikova jekla). Problem je v tem, da ni primerne materiala, ki bi imel hkrati dobro toplotno prevodnost in konstanten razteznostni koeficient. Pri visokih ohlajevalnih hitrostih bi bilo tolmačenje dilatometrskih rezultatov tudi kočljivo zaradi velikih temperaturnih gradientov. Tu dilatometrijo vsaj delno nadomesti termična analiza in magnetna merjenja.

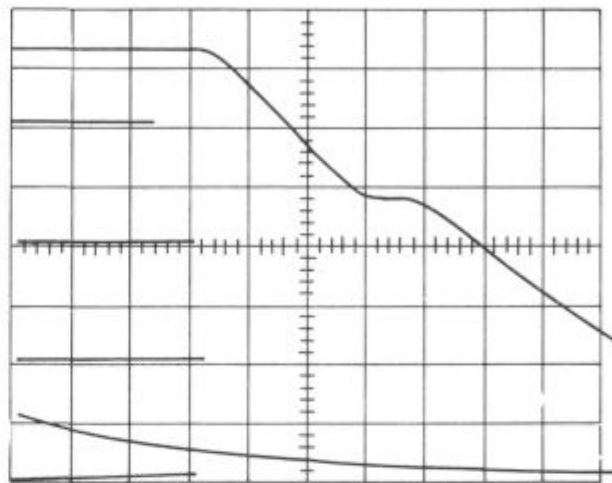
Eden izmed najudobnejših načinov je enostavna termična analiza, ki je osnovana na pojavu, da se pri vsaki transformaciji strukturnih faz znatno spremeni notranja energija, kar začasno vpliva na potek temperature v odvisnosti od časa. To pomeni, da je treba samo registrirati ohlajevalne krivulje na čim manjših preizkušanjih, s čemer preprečimo vpliv temperaturnih gradientov na rezultate meritev. Zaradi zaščite pred korozijo je najbolje eksperimentirati v vakuumu, kot ohlajevalno sredstvo pa uporabljati inertni plin. Registracijo najlaže izvedemo s primernim oscilografom. Na osi x izberemo primerno časovno bazo, na osi y pa vodimo ojačeno napetost termoelementa. Primer za ogljikovo jeklo z okrog 0,35 % C vidimo na slikah 2 in 3.

Magnetna merjenja so osnovana na pojavu, da so nekatere strukturne faze v jeklu v določenih temperaturnih intervalih feromagnetne, v drugih pa paramagnetne, modifikacija γ pa je pri vseh temperaturah paramagnetna. Če se transformacija $\gamma \rightarrow \alpha$ izvrši pri dovolj nizki temperaturi, spremlja spremeno pojav feromagnetizma.

Spremembo magnetnih lastnosti detektiramo z magnetnimi tehtnicami ali z merjenjem induktivnosti tuljav, katerih jedra so iz raziskovanega jekla. Prvi način je možno uporabiti predvsem v laboratorijih. Pri njem izkoriščamo zakonitost, da je sila na snov v nehomogenem magnetnem polju odvisna od susceptibilnosti materiala. Pomankljivost metode je v tem, da so načini ohlajanja dokaj omejeni, s tem pa tudi ohlajevalne hitrosti.

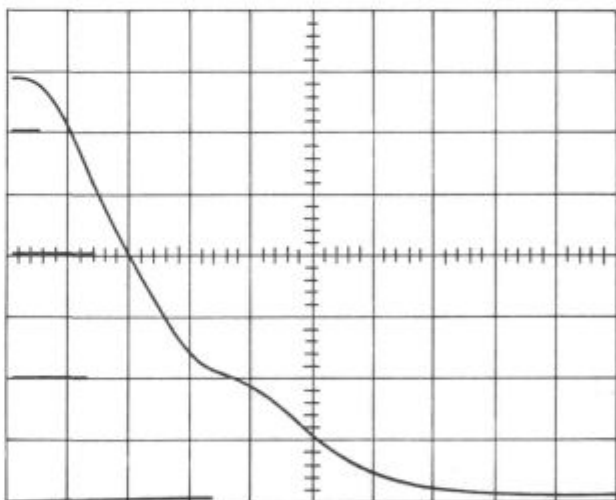
Drugi način se že uporablja v industrijskih laboratorijih, npr. za določanje točk Ms. Induktiv-

nost tuljave z merjencem najlaže merimo v enem izmed ustreznih mostov. Če na horizontalne odklonske plošče katodne cevi priključimo napetost termoelementa, privarjenega na preizkušane, vertikalne plošče pa nam služijo kot ničelni indikator, je dokaj preprosto določiti temperature, pri katerih dobimo močan prirastek induktivnosti tuljave.



Slika 2

Posnetek ohlajevalne krivulje direktno z zaslona oscilografa s spominom. Enemu razdelku na abscisni osi ustreza 0,5 s. Na ordinatni osi je kalibrirana napetost termoelementa. Transformacija $\gamma \rightarrow \alpha$ se je izvršila v martenzitni stopnji.



Slika 3

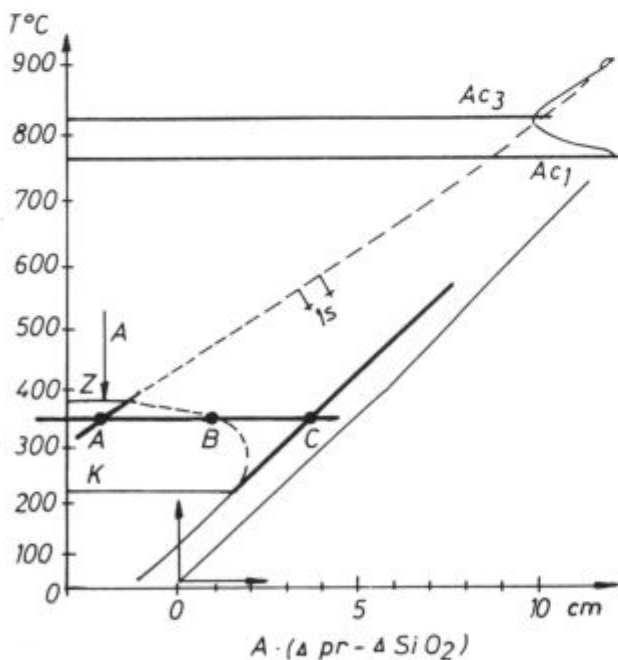
Posnetek ohlajevalne krivulje direktno z zaslona oscilografa s spominom. Enemu razdelku na abscisni osi ustreza 0,2 s. Na ordinatni osi je kalibrirana napetost termoelementa. Transformacija $\gamma \rightarrow \alpha$ se je izvršila v martenzitni stopnji.

RAZLAGA DIAGRAMOV $t - T - \Delta l$

Dilatometrsko določanje faznih premen je osnovano na pojavu, da je specifična prostornina različnih faz različna in da se za posamezne faze razlikujejo tudi linearni temperaturni razteznostni

koeficienti. Numerični podatki za omenjene konstante se spreminjajo od ene do druge vrste jekla v odvisnosti od kemične sestave (poseben vpliv ima vsebnost ogljika). Najpogosteje nas zanima premena avstenita v ferit, mešanico ferita in karbidov ter v martenzit. Vse nastale faze imajo večjo specifično prostornino kot avstenit. Razlika je odvisna še od temperature, ker je temperaturni razteznostni koeficient avstenita okrog 1,7-krat večji kot ferita ali martenzita; torej je razlika manjša pri višjih kot pri nižjih temperaturah. Če želimo pri dilatometriškem eksperimentu za neko temperaturo vedeti, kolikšen del avstenita se je že preoblikoval v novo fazo, je potrebno poznati specifično prostornino za avstenit in nastalo fazo pri določeni temperaturi, nato pa linearno interpolirati izmerjeno vrednost specifične prostornine med prej omenjeni vrednosti. Običajno ne poznamo vseh potrebnih specifičnih prostornin, ampak moramo ekstrapolirati eksperimentalno določene vrednosti. Natančnost takega določevanja ni posebno dobra, vendar je za prakso zadovoljiva. Ekstrapolacija je uspešna samo v primeru, če poteče transformacija avstenita vsaj pri nižjih temperaturah popolnoma, to pomeni, da pri normalni temperaturi ne sme biti prisoten zaostali avstenit. V nasprotnem primeru je treba najprej določiti vsebnost zaostalega avstenita, nato pa ostalih faz.

Na sliki št. 4 vidimo primer za določanje odstotka pretvorjenega avstenita v jeklu VCMo-125 (C.4730), ki je bilo po 10-minutni avstenitizaciji pri 900°C ohlajeno v dilatometriški kremenčevi



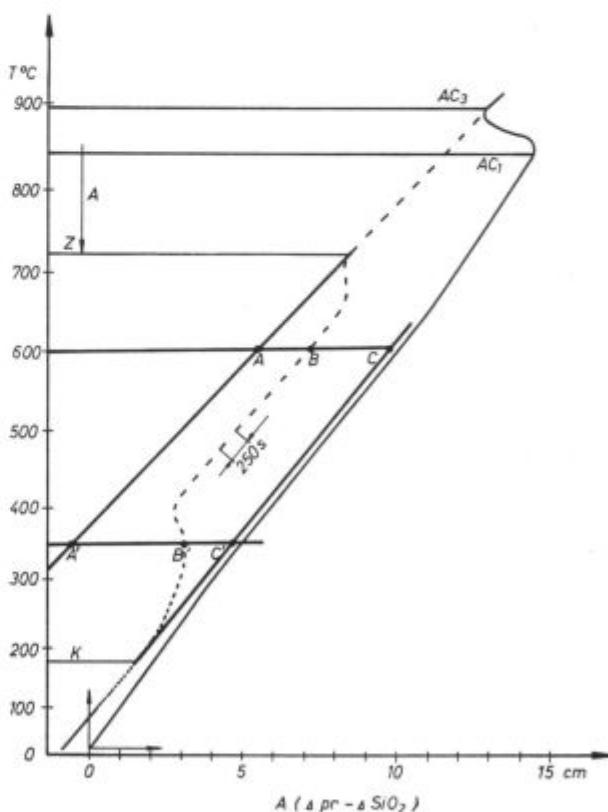
Slika 4

Dilatometriški diagram za jeklo VCMo-125; avstenitizacija 10 minut pri temperaturi 900°C; ohlajanje brez zaščitne cevi s pihanjem zraka; $v = \frac{500}{900} = 22^\circ \text{C/s}$

cevki s pihanjem zraka. Poprečna ohlajevalna hitrost med 900 in 500°C je 29°C/s. Iz oblike krivulje je razvidno, da je začetek premene avstenita pri temperaturi 385°C, konec pa pri 225°C. Pri nadaljnjem ohlajanju je dilatometriška krivulja spet približno premica. Določimo, koliko avstenita se je že pretvorilo pri 350°C! Najprej ekstrapoliramo dilatometriško krivuljo pred pretvorbo in po njej, nato pa potegnemo zaželeno izotermo. Presečne točke izoterme s podaljškom dilatometriške krivulje in samo dilatometriško krivuljo so označene z A, B in C. Odstotek pretvorjenega avstenita dobimo po obrazcu:

$$p (\text{v} \%) = \frac{AB}{AC} \cdot 100 \% (= 54 \%) \quad (2)$$

Na sliki 4 vidimo, da je na dilatometriški krivulji pri omenjenem načinu ohlajanja samo ena anomalija, kar pomeni, da se je avstenit pretvoril v eno samo novo fazo. Pogosto srečamo bolj zapletene primere, eden takih je na sliki št. 5. Postopek določanja deleža avstenita, ki se je pretvoril v nove faze, je enak kot prej; vedno najprej ekstrapoliramo dilatometriško krivuljo čistega avstenita in po popolni premeni avstenita, nato pa podobno kot prej določimo za posamezno izotermo, koliko avstenita se je že pretvorilo



Slika 5

Dilatometriški diagram za jeklo OCR-12 VM; avstenitizacija 10 minut pri temperaturi 920°C; ohlajanje s hitrostjo $v = \frac{500}{920} = 4,6^\circ \text{C/min.}$

v nove faze. Tak način ni povsem pravilen, ker smo predpostavili, da imajo vse nove faze isto specifično prostornino. Napaka zaradi tega navadno ni dosti večja, kot je natančnost odčitavanja dolžin na diagramu.

Nekoliko večji problem imamo pri izločanju (ali raztopu) karbidov. Tu bi morali določiti ustrezen odstotek iz sistema enačb:

$$V_A + V_K = V' \quad \text{enačba volumnske sestave} \quad (3)$$

$$\rho_A V_A + \rho_K V_K = \rho_A V_o \quad \text{enačba ohranitve mase}$$

- V_A prostornina osnove
- V_K prostornina karbidov
- V' prostornina vzorca po izločitvi karbidov
- V_o prostornina vzorca pred izločanjem karbidov
- ρ_A ustrezni gostoti
- ρ_K

Rešitev za V_K je:

$$V_K = \frac{\rho_A (V' - V_o)}{\rho_A - \rho_K}$$

Prostorninski del karbidov v odstotkih je:

$$\rho_K = \frac{\rho_A \cdot \frac{\Delta V}{V}}{\rho_A - \rho_K} \cdot 100 \% = \frac{3 \rho_A \cdot \frac{\Delta l}{l}}{\rho_A - \rho_K} \cdot 100 \% \quad (4)$$

Spet imamo linearno zvezo med vsebnostjo karbidov in dilatacijo, poznati pa je treba razmerje med gostoto karbidov in faze, iz katere so se karbidi izločili pri določeni temperaturi.

S pomočjo dilatometra lahko določimo tudi odstotek zaostalega avstenita, kar je zelo ugodno za popolnost TTT diagramov. Po dilatometrijskem poskusu pogosto ostane v preizkušancu še nekaj zaostalega avstenita tudi pri normalni temperaturi. Podoben pojav imamo pri kaljenju izdelkov v proizvodnji. Vsebnost avstenita ima znaten vpliv na lastnosti jekla, zaradi česar je razumljiva težnja za njenim določanjem.

Dilatometrijski način je osnovan na pojavu, da se zaradi vsebnosti nepretvorjenega avstenita spremeni naklon dilatometrijske krivulje na začetku (pri 20° C). Če bi vzorec vseboval edino fazo α , bi znašal njegov temperaturni razteznostni koeficient α_F , če pa edino fazo γ , bi bil ta koeficient α_A . Teoretična obdelava pojava da razmerje

$$\frac{\alpha_A}{\alpha_F} = 1,7$$

Vzorec z dvofazno sestavo ($\alpha + \gamma$) ima po predpostavki, da velja zakon za mešanice, temperaturni razteznostni koeficient

$$\alpha_{A+F} = \alpha_A \cdot \frac{A \%}{100} + \alpha_F \cdot \frac{100 - A \%}{100}$$

A vsebnost zaostalega avstenita v %

Od tod dobimo:

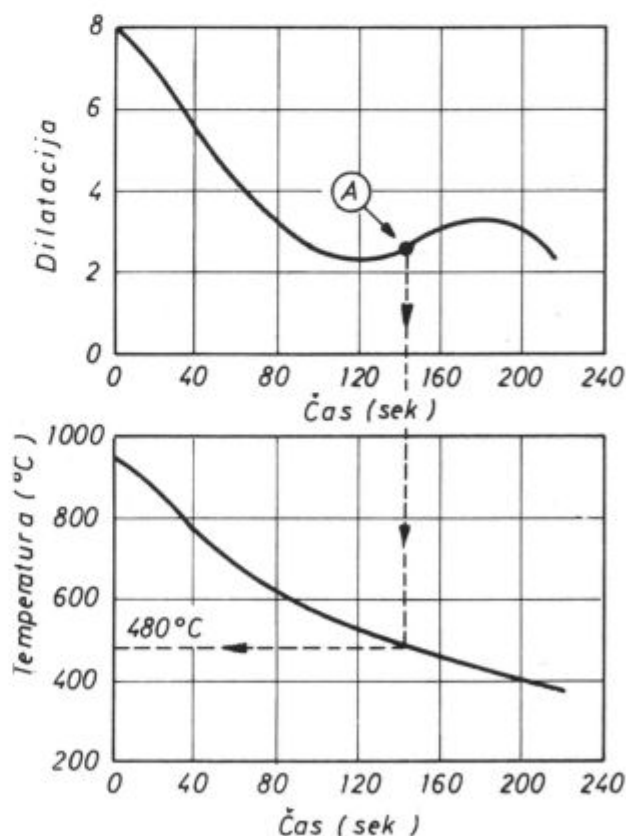
$$A \% = 100 \cdot \frac{\alpha_{A+F} - \alpha_F}{\alpha_A - \alpha_F}$$

α_{A+F} , α_F in α_A je treba izmeriti v istem temperaturnem intervalu. Problem je v tem, kako dobiti preizkušanece iz istega jekla, a s strukturo, ki bi ustrezala fazi α v preizkušancu z ostalim avstenitom. Nekateri avtorji trdijo, da je najboljši način popuščanje preizkušancev z ostalim avstenitom pri temperaturah med 300 in 450° C. Za merjenje ostalih temperaturnih razteznostnih koeficientov je najbolje uporabljati kombinacijo absolutne in diferencialne dilatometrije. V vsakem primeru je treba vzorce najprej popuščati pri temperaturi 100° C, če merimo temperaturni razteznostni koeficient v intervalu 20 do 100° C.

S podatki, ki jih razberemo iz absolutne dilatometrijske krivulje, lahko določimo tudi temperaturo, pri katerih se avstenit najhitreje pretvarja v nove faze. V tistih točkah je odvod dolžine preizkušanca po času maksimalen. Ker je:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{d(l - l_{20})}{dt} = \frac{d(\Delta l)}{dt}$$

moramo narisati samo krivuljo $\Delta l = \Delta l(t)$ in poiskati čase, pri katerih je naklon tangente na krivuljo maksimalen. Iz ustrezne ohlajevalne krivulje določimo še temperature. Primer vidimo na sliki št. 6.



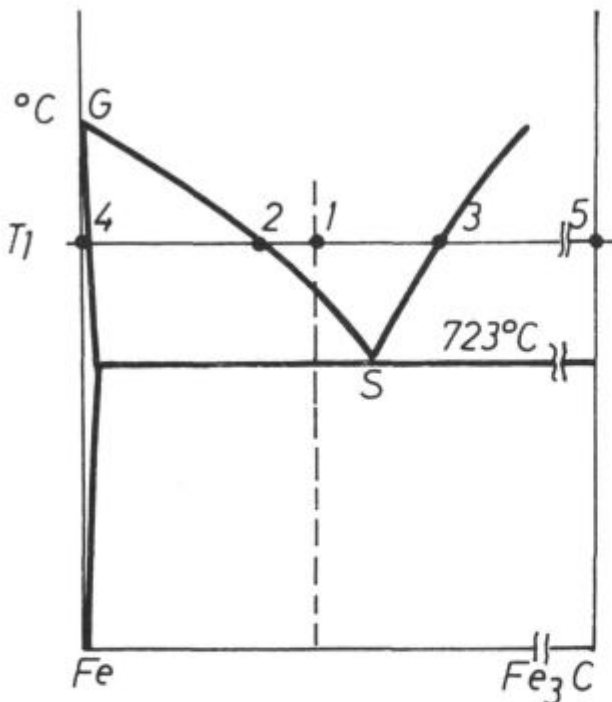
Slika 6
Določanje temperature, pri kateri je hitrost transformacije $\gamma \rightarrow \alpha$ maksimalna.

IZDELAVA TTT DIAGRAMOV

Obstajata dve vrsti TTT diagramov: izotermni in kontinuirni. Pri obeh tipih rišemo v koordinatnem sistemu $T/\log t$ področja transformacije avstenita v nove faze. Razlika je v tem, da pri poskusu za izotermni diagram poteka premena pri konstantni temperaturi, pri poskusu za kontinuirni TTT diagram pa se temperatura menja v odvisnosti od časa in ima njen potek najmočnejši vpliv na nastale transformacije. Do sedaj smo obravnavali samo določanje poteka premene, nič pa narave nastalih faz. Za razpoznavanje le-teh uporabljamo mikroskopiranje, rentgensko difraktometrijo in podobno. S poznavanjem splošnih značilnosti nastajanja in razpada avstenita nam dosti povedo tudi same dilatometrijske krivulje.

Avstenitizacija je transformacija, ki da iz zmesi ferita in cementita bolj ali manj homogeno avstenitno fazo. To definicijo lahko uporabljamo tudi za martenzitno izhodno strukturo, ker nastane iz martenzita pri segrevanju najprej ferit in cementit¹, šele nato dosežemo področje stabilnosti faze γ .

Na delu metastabilnega Fe-C diagrama, slika št. 7, vidimo shematski prikaz avstenitizacije pod eutektoidno temperaturo ga sestavljajo delci cementita v feritni osnovi. Če vzorec segrejemo na temperaturo T_1 , cementit (točka 5) v stiku s feritom (točka 4) ni več v ravnotežju, ampak nastane med njima reakcija; delci cementita se obdajo z avstenitom. V trenutku nastanka avstenita je sistem v sledečem stanju:

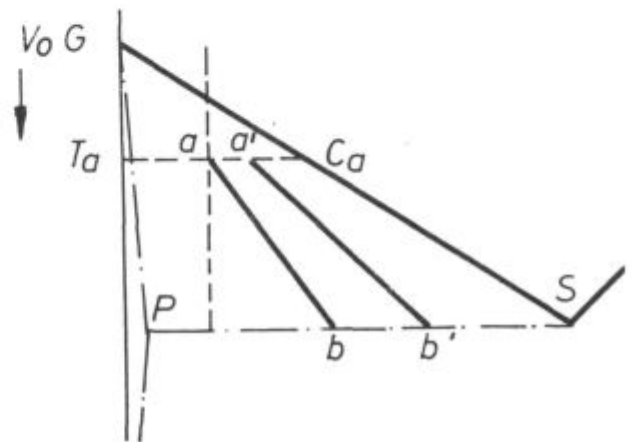


Slika 7

Shematski prikaz procesa avstenitizacije na delu Fe-C diagrama.

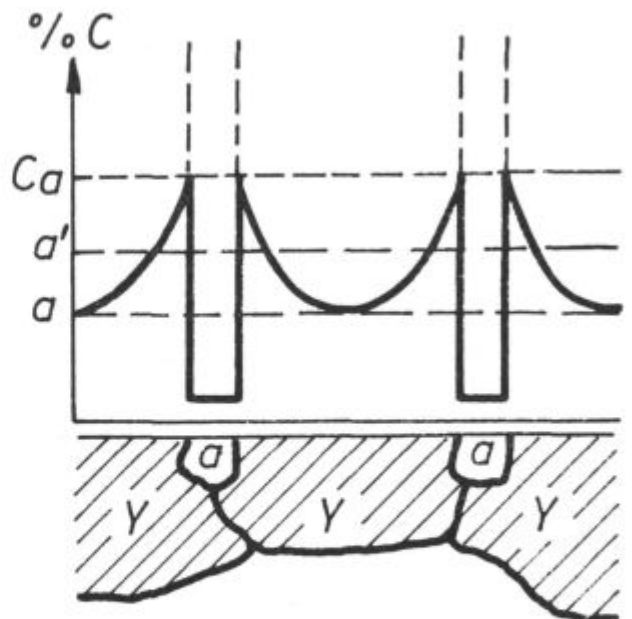
cementit (točka 5), avstenit v dotiku s feritom (točka 2), ferit (točka 4). To pomeni, da v avstenitni fazi še nimamo enakomerne koncentracije ogljika (pada od točke 3 k 2). Maksimalna koncentracija ostane nespremenjena, dokler še imamo cementit, podobno je z minimalno koncentracijo, dokler še obstaja ferit. Avstenit teži k ravnotežju, predstavljenim s točko 1. Avstenitizacija poteka analogno pri nadevtektoidnih jeklih. V vsakem primeru so temperature, pri katerih se izvrši, odvisne od ogrevalne hitrosti zaradi potrebnih difuzijskih procesov.

Potek transformacije $\gamma \rightarrow \alpha$ je odvisen od ohlajevalne hitrosti že pri elementarnem železu, še bolj pa v primeru, ko je v železu raztopljen ogljik in drugi legirni elementi (to je pri jeklu). Vzrok za to je končna difuzijska hitrost ogljika.



Slika 8a

Vpliv ohlajevalne hitrosti na začetek izločanja feritnih kristalov.



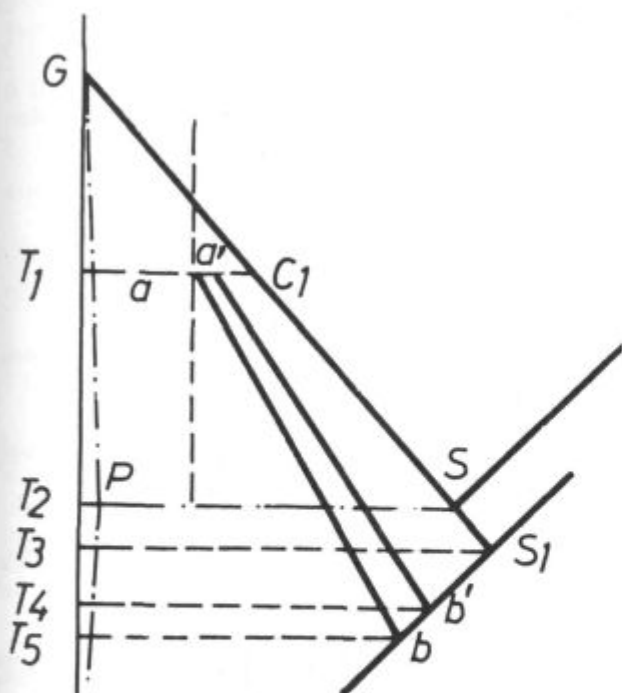
Slika 8b

Potek koncentracije ogljika v avstenitu in feritu.

Ce ohlajamo jeklo z 0,2 % C od temperature avstenitizacije z določeno hitrostjo v_0 , se feritni kristali ne začnejo izločati na ravnotežni črti GS (slika 8a), ampak pri nekoliko nižji temperaturi. Med svojim nastajanjem ferit odpušča ogljik v okoliški avstenit, ki ima na meji sestavo C_a (slika 8b); ta sestava je pri temperaturi T_a v ravnotežju s feritom. Pri nadaljnjem ohlajanju se koncentracija ogljika na meji avstenit-ferit spreminja po črti C_aS , koncentracija na največji oddaljenosti od meje po črti ab , srednja koncentracija pa po $a'b'$. Črta ab hkrati predstavlja temperature začetka premene v odvisnosti od vsebnosti ogljika in to za ohlajevalno hitrost v_0 . Črta ab ima tudi večji naklon kot GS, kar pomeni, da stabilnost avstenita raste pri povišanju vsebnosti ogljika.

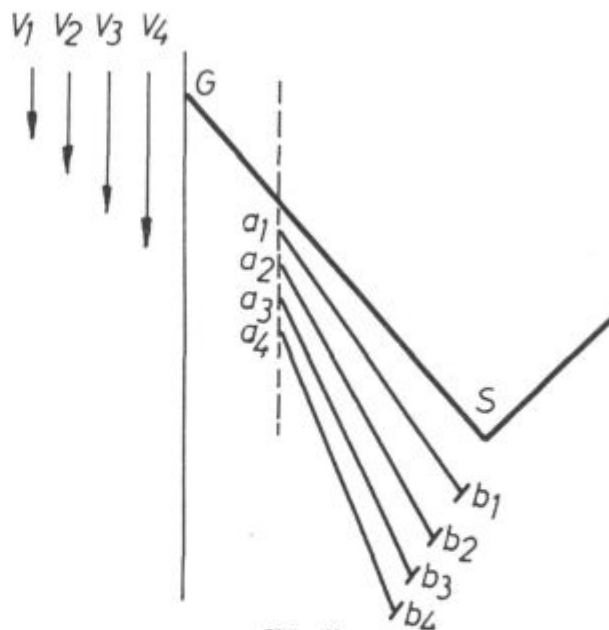
Novi kristali ferita lahko nastajajo v področju nizke koncentracije ogljika. Ko doseže avstenit na meji točko S, se cementit ne pojavi takoj pri temperaturi T_2 (slika 9a), ampak pri S_1 , to je pri temperaturi T_3 . Avstenit, ki ni v direktnem stiku s feritom, ima še nižjo vsebnost ogljika in doseže mejo nasičenja pri T_4 ; iz avstenita, ki vsebuje najmanj ogljika, se cementit izloči šele v točki b pri temperaturi T_5 . Točka b' predstavlja poprečno sestavo evtektoidne strukture. V neposredni bližini cementita se avstenit osiromaši z ogljikom, zato nastane ferit. Na meji ferita je dovolj ogljika, zato se tam pojavi cementit itd. Taka struktura se imenuje perlit.

Povišana ohlajevalna hitrost pomakne evtektoidno točko k nižjim temperaturam in k nižji koncentraciji ogljika (slika 9b). Pri nižji temperaturi transformacije se poveča število klic, zaradi česar so perlitna zrna številnejša in manjša. Lahko



Slika 9a

Vpliv ohlajevalne hitrosti na potek tvorbe perlita.

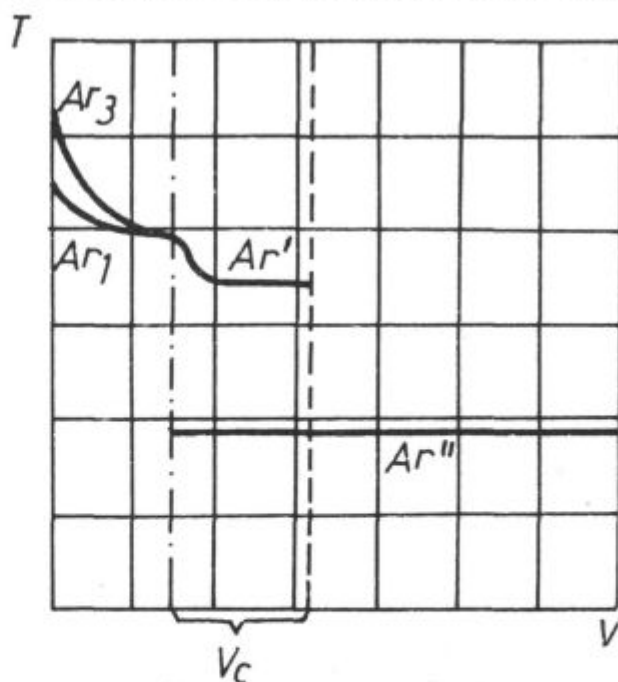


Slika 9b

Vpliv različnih ohlajevalnih hitrosti na premik evtektoidne točke.

se zgodi, da jih z optičnim mikroskopom sploh ne moremo več ločiti.

Pri zelo visokih ohlajevalnih hitrostih je tvorba perlita onemogočena. Maksimalna hitrost, pri kateri še dobimo popolno perlitno transformacijo, oziroma najmanjša hitrost, pri kateri dobimo transformacijo avstenita tudi pri Ar'' (slika 10), se imenuje spodnja kritična hitrost za kaljenje. Na sliki 10 vidimo odvisnost temperature transformacije avstenita od ohlajevalne hitrosti. Nad spod-



Slika 10

Odvisnost temperature transformacije avstenita od ohlajevalne hitrosti.

njo kritično hitrostjo za kaljenje v_0 se izvrši transformacija v dveh etapah po novem mehanizmu. Pri Ar'' se pojavi matenzit. Nad zgornjo kritično hitrostjo je transformacija avstenitna na stopnici Ar' nemogoča in se začne pretvarjati šele pri temperaturi Ar'' .

Pri ohlajanju s hitrostjo, ki je le malo manjša od gornje kritične, je difuzija ogljika še zadovoljiva za pojav transformacije, a je difuzija železa prepočasna. Zaradi tega se ferit orientira v smeri nekaterih ravnin v avstenitni mreži in služi kot klica za tvorbo medstopenjskih struktur (pri perlitu ima to vlogo cementit). Medstopenjskih struktur je več, a v novejšem času opažamo težnjo, da se imenujejo s skupnim imenom bainit.

Poglejmo na primeru jekla VCMo-125 s kemično sestavo v %:

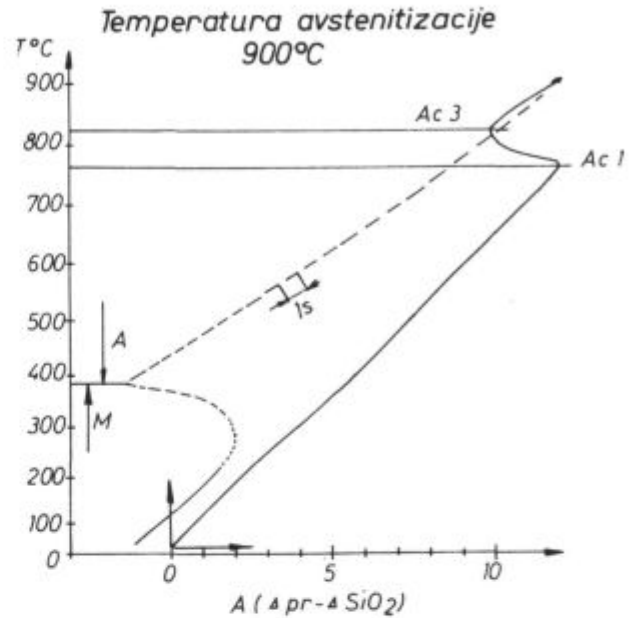
C	Mn	Cr	Ni	Mo	Si	Cu
0,25	0,68	1,1	0,19	0,22	0,20	0,16

kako se prej opisane transformacije izražajo na dilatometrijskih krivuljah pri kontinuirnem ohlajanju!

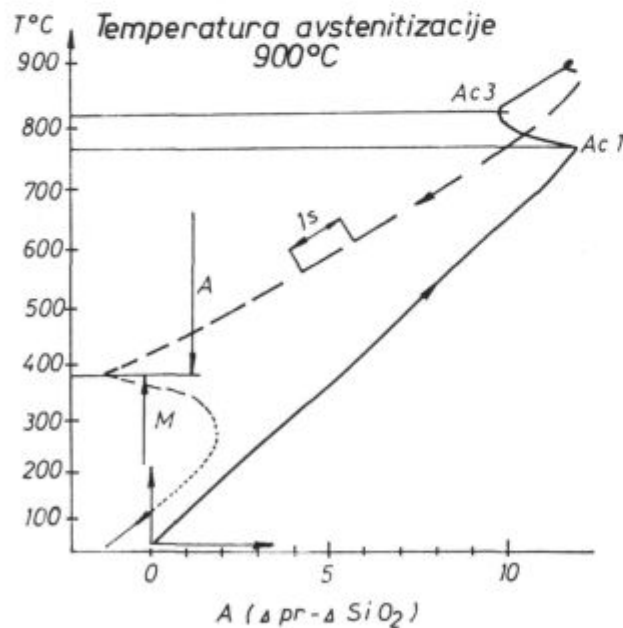
Na sliki 11 vidimo, da se je ves avstenit pretvoril v martenzit. Anomalija na dilatometrijski krivulji pri višjih temperaturah je posledica razlike temperatur kremenčeve cevke in preizkušanca pri hitrem ohlajanju. Popolno transformacijo avstenita v martenzit dobimo pri nekoliko počasnejšem ohlajanju (slika 12). Pri še počasnejšem ohlajanju (slika 13) se pojav predevekteoidnega ferita izraža kot majhna sprememba naklona dilatometrijske krivulje med 530 in 490°C. Pri tej zadnji temperaturi se začneja močna ekspanzija, ki predstavlja pojav bainita. Pri 385°C ima krivu-

lja nezvezen odvod — znak, da je tam začetek tvorbe martenzita. Pri naslednji manjši ohlajevalni hitrosti (slika 14) ima dilatometrijska krivulja sledeče značilnosti:

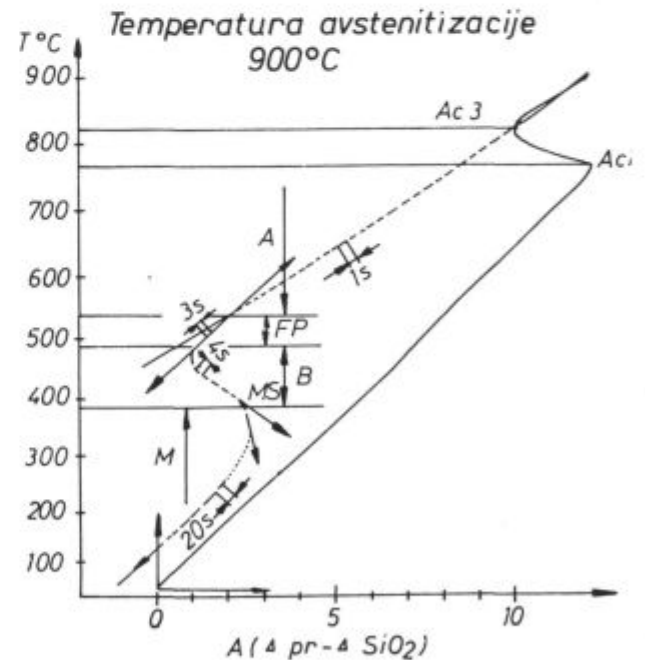
— prva sprememba nagiba med 650 in 570°C: predevekteoidni ferit



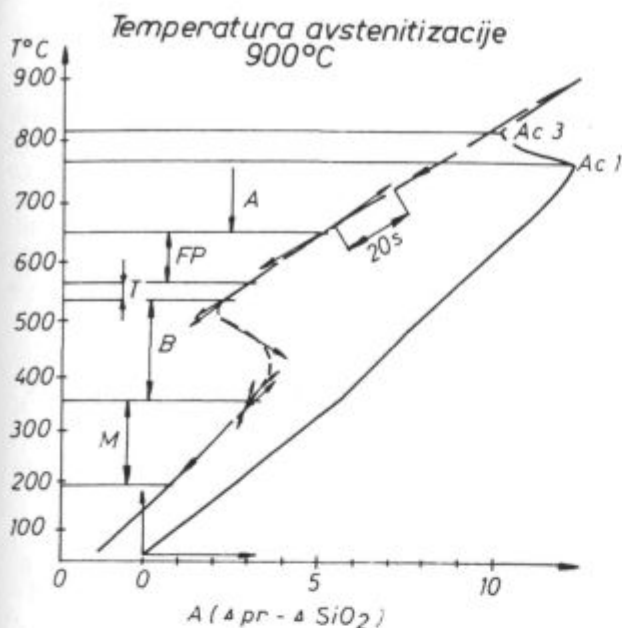
Slika 12
Dilatometrijski diagram za jeklo VCMo-125; avstenitizacija 10 min. pri 900°C; ohlajanje brez zaščitne cevi s pihanjem zraka; $v \frac{500}{900} = 22^\circ \text{C/s}$



Slika 11
Dilatometrijski diagram za jeklo VCMo-125; avstenitizacija 10 min. pri 900°C; ohlajanje v vodi; $v \frac{500}{900} = 53^\circ \text{C/s}$



Slika 13
Dilatometrijski diagram za jeklo VCMo-125; avstenitizacija 10 min. pri 900°C; ohlajanje brez zaščitne cevi na zraku; $v \frac{500}{900} = 9,5^\circ \text{C/s}$



Slika 14

Dilatometrijski diagram za jeklo VCMo-125; avstenitizacija 10 min. pri 900°C; ohlajanje z uporabo zaščitne cevi I na zraku; $v = \frac{500}{900} = 2,8^\circ \text{C/s}$

— začetek krivljenja med 570 in 540°C: prehodna tvorba manjše količine gornjega bainita

— ekspanzija od 540°C naprej: tvorba spodnjega bainita

— pri 360°C začena tvorba manjše količine martenzita iz zaostalega avstenita.

Iz dilatometrijske krivulje na sliki 15, ki je bila posneta pri že zelo nizki ohlajevalni hitrosti, razberemo:

— od 740 do 725°C: tvorba predevtektoidnega ferita

— od 725 do 650°C: tvorba perlita

— od 650 do 515°C: začasen zastoj premene avstenita

— od 515 do 315°C: tvorba bainita

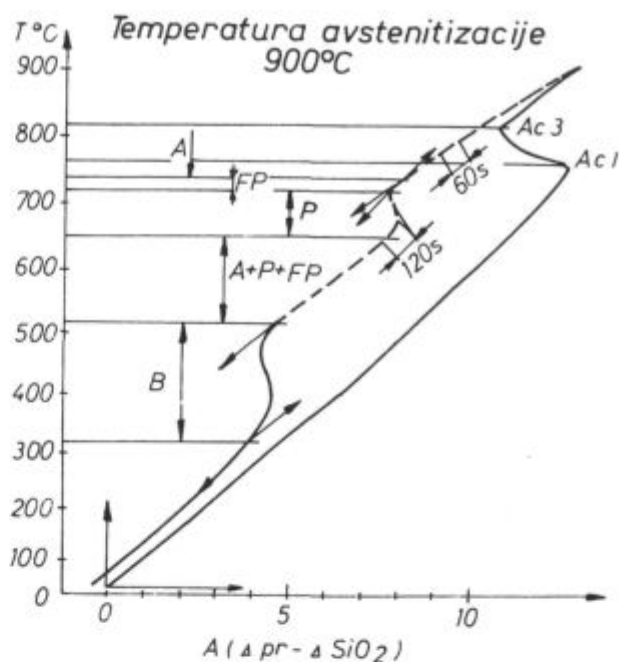
— od 315°C naprej z dilatometrijo ni možno odkriti premen; če nastopajo, so v malem obsegu.

Ne da bi računali vsebnost posameznih faz po premeni avstenita, dobimo iz gornjih podatkov TTT diagram, ki ga kaže slika 16.

Za ilustracijo, kako lahko legirani elementi spremenijo pretvarjanje avstenita, je na sliki 17 podan kontinuirni TTT diagram nadevtektoidnega jekla OCR-12 VM (Č.4850). Izločanje karbidov ni posebej prikazano, njihova vsebnost po ohlajanju s hitrostjo 150°C/h je bila ocenjena mikroskopsko na okrog 10%.

Snemanje izotermnih TTT diagramov z dilatometrom DITIRC je prikazano na sliki 18. Na dilatometrijskem diagramu so tipični odseki:

— krivulja ohlajanja CD od 900°C do temperature izotermne držanja 725°C



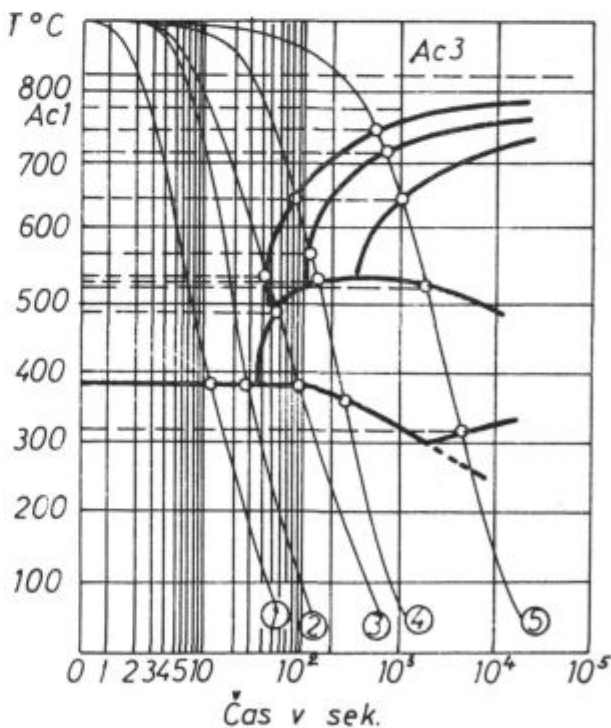
Slika 15

Dilatometrijski diagram za jeklo VCMo-125; avstenitizacija 10 min. pri 900°C; ohlajanje v peči za avstenitizacijo s prekinitvijo električnega toka; $v = \frac{500}{900} = 10,5^\circ \text{C/min.}$

— čas izotermne inkubacije DE

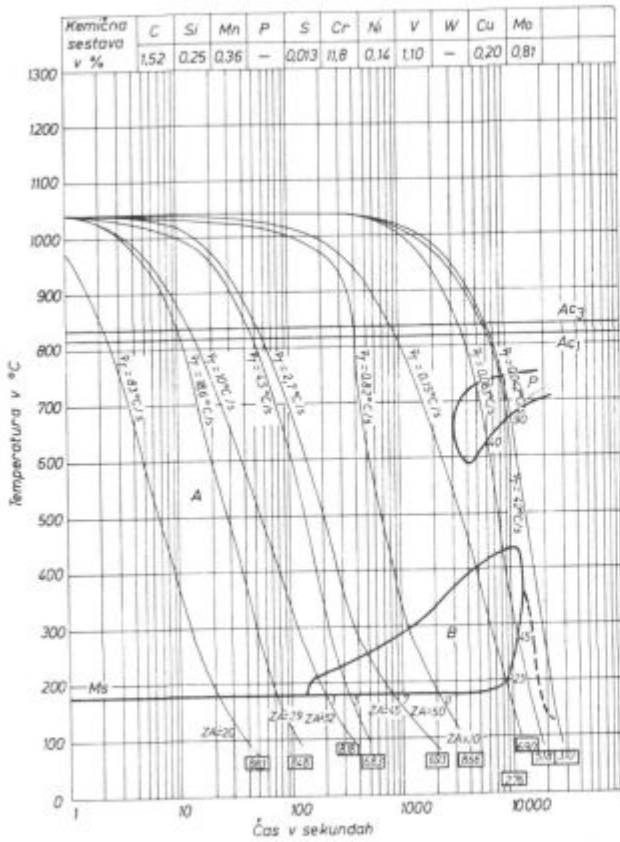
— krivulja izotermne transformacije EFG

— končna ohlajevalna krivulja HI, na kateri ne vidimo nikakršne transformacije

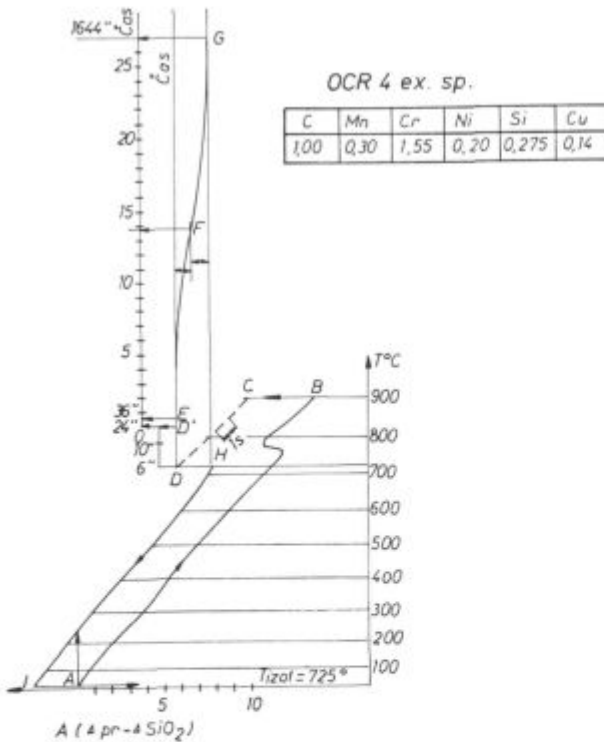


Slika 16

Kontinuirni TTT diagram za jeklo VCMo-125; avstenitizacija 10 min. pri 900°C.



Slika 17
Kontinuirni TTT diagram za jeklo OCR-12 VM; avstenitizacija 10 min. pri 1040°C.

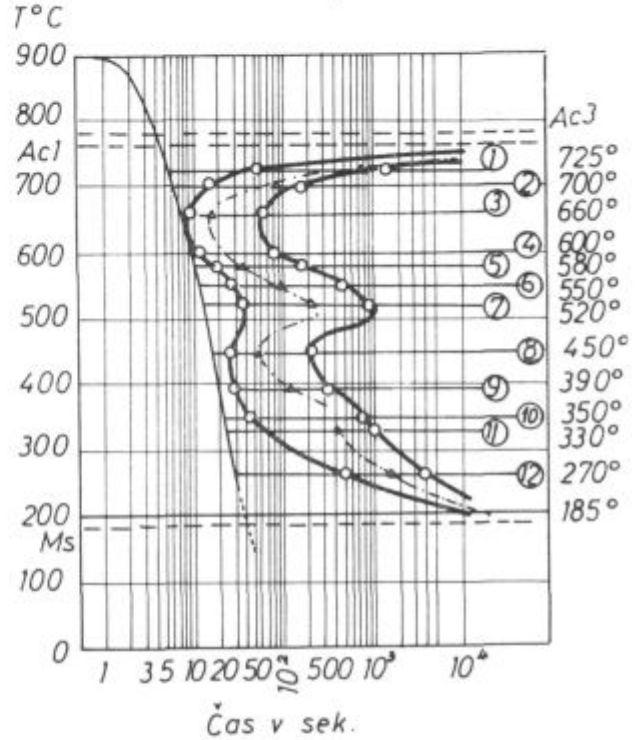


Slika 18
Primer snemanja izotermnega dilatometrijskega diagrama na jeklu OCR-4 ex. sp.; avstenitizacija 10 min. pri 900°C; izotermno držanje pri 725°C.

Pri snemanju odsekov AB, CD in HI je bil registrator vključen na položaj »xy«, pri snemanju izotermne krivulje DEFG pa na »xt«.

Podobne krivulje posnamemo še pri drugih temperaturah izotermne kopeli, za katero je najboljše uporabljati evtektsko zlitino Pb/Bi², ker se lahko uporablja v zelo širokem temperaturnem intervalu. Do temperature izotermnega držanja hitreje ohlajamo s pihanjem zraka kot v kopeli. Primer izotermnega TTT diagrama vidimo na sliki 19.

OCR 4 ex. sp.



Slika 19
Izotermni TTT diagram za jeklo OCR-4 ex. sp.; avstenitizacija 10 min. pri 900°C.

PRAKTIČNA UPORABA TTT DIAGRAMOV

Za praktično uporabo kontinuirnih TTT diagramov v toplotni obdelavi jeklenih izdelkov je nujno poznati ohlajevalne krivulje po preseku kosov. Najboljše bi bilo, če bi jih določili teoretično, ker pri merjenju temperature v notranjosti primerkov delno zmotimo temperaturno polje. Zaradi pomanjkanja podatkov je nemogoče točno računati poteka temperature. Običajno računamo samo za okrogle in pravokotne profile. Temperatura se v trdnih telesih spreminja skladno s toplotno difuzijsko enačbo:

$$\Delta T = \frac{\delta T}{\delta t}$$

Koeficient D je odvisen od toplotne prevodnosti, specifične toplote in gostote materiala. Enačba v tej obliki velja samo v primeru, če so tempera-

turni gradienti mali ali če je koeficient toplotne prevodnosti malo odvisen od temperature, sicer je enačba nelinearna. Gornjo enačbo je možno analitično rešiti le v primeru zelo idealiziranih robnih in začetnih pogojev. Realnejše ohlajevalne pogoje, ki jih določimo eksperimentalno, lahko upoštevamo le pri numeričnem reševanju.

Če položimo na prozornem papirju narisane ohlajevalne krivulje na ustrezen TTT diagram, lahko spremljamo, katere transformacije se bodo izvršile v različnih globinah profila, če pa razpolagamo še s podatki o fizikalnih lastnostih posameznih struktur (te bi izmerili na izotermno obdelanih preizkušancih) lahko določimo različne karakteristike kontinuirno ohlajenega kosa. Med take lastnosti moramo šteti predvsem trdoto in trdnost.

V novejšem času so dobili praktičen pomen tudi izotermni TTT diagrami in to predvsem za izotermnoboljšanje, stopenjsko kaljenje in izotermno normalizacijo.

Ker je v vsakem TTT diagramu narisano tudi področje premene $\alpha \rightarrow \gamma$, služijo tudi za določanje žarilnih temperatur.

Pri praktični uporabi TTT diagramov moramo upoštevati, da so transformacijske krivulje izdelane v posebnih pogojih: samovoljno smo izbrali pogoje avstenizacije (čas in temperaturo), čeprav smo težili, da se približamo pogojem v praksi, poleg tega pa lahko imamo razliko v kemijski sestavi dilatometrijskih preizkušancev in izdelkov v proizvodnji. Na potek transformacije vplivajo tudi notranje napetosti, ker material vedno teži za tem, da je v takem stanju, v katerem se zmanjša pritisk.

Literatura

1. de Sy A., Vidts J.: *Métallurgie Structurale*, 2^{ème} édition Paris, DUNOD, 1968
2. Cizeron, G.: »Dilatometrie de trmepe«, Mesures (Paris) Vol. 33, N° 8, 9 (1968)

ZUSAMMENFASSUNG

Es ist die dilatometrische Methode für die Begleitung der Phasenumwandlungen im Stahl beschrieben. Als Beispiel einer Aparatur, für die Messung der Ausdehnungen beim isothermen Halten und kontinuierlicher Abkühlung ist der Dilatometer DITIRC beschrieben. Die vielseitigen Möglichkeiten für die Anwendung dieser Aparatur sind betont. Aufgezählt sind die Arten für die Erzielung verschiedener Abkühlungsgeschwindigkeiten. Für die Ergänzung der Umwandlungskurven einiger Stähle kann die magnetische Methode und die thermische Analyse ange-

wendet werden. Die Auswertung der dilatometrischen Diagramme bei der Ausarbeitung der TTT Diagramme wird erklärt. Zwecks der einfacheren Identifizierung der entstehenden Phasen während des dilatometrischen Versuches, sind die Phasenumwandlungen bei der Austenitisierung und Abkühlung der austenitischen Phase angegeben. Einige Beispiele der dilatometrischen Kurven und davon erhaltenen TTT Diagrammen sind angegeben. Bei der Beschreibung des Verfahrens für die praktische Anwendung der TTT Diagramme, wird auf die Faktoren die dabei berücksichtigt werden müssen hingedeutet.

SUMMARY

The dilatometric method for studying phase transformations in steel is described. As an example of the apparatus for isothermic measurements of expansions and for measurements during continuous cooling the dilatometer DITIRC is described. The possibilities of the use of this apparatus are stressed, and the ways how to obtain various cooling rates are enumerated. As supplement to the transformation curves of some steels also magnetic

method and thermal analysis can be used. Evaluation of the dilatometric plots is explained when TTT diagrams are composed. For easier identification of the formed phases during the dilatometric test the phase transformations in austempering are cited. Some examples of dilatometric curves and the obtained TTT diagrams are given. The description of the practical use of TTT diagrams stresses the parameters which must be taken in account.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описан dilatометрический метод прослеживания различных фазных перемен в стали. Напр.: dilatометр по DITIRC-у, прибор для измерения растяжения при изотермическом задерживании и непрерывном охлаждении. Подчеркнуты возможности употребления этого прибора и отмечены способы достижения различной скорости охлаждения. Чтобы дополнить переменные кривые некоторых сортов сталей можно употребить магнитный метод и термический анализ. Дано объяснение к оценке dilat-

ометрических диаграмм при разработке диаграмм TTT. Для более легкой идентификации полученных фаз при dilatометрическом исследовании приведены переменные фаз во время австенитизации и охлаждения австенитной фазы. Рассмотрены несколько примеров dilatометрических кривых и, полученных на их основании, TTT диаграмм. При описании способа применения TTT диаграмм в практическом осуществлении упомянуты факторы которые надо при этом учесть.