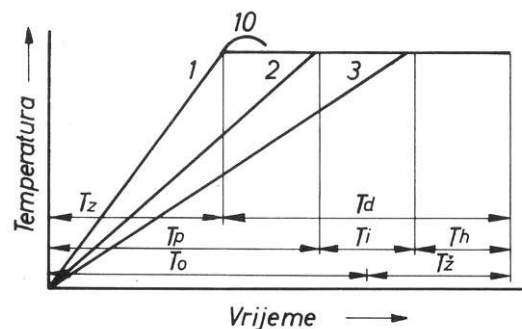


PROBLEMATIKA KALJENJA

Da bi se obavilo kaljenje čelik prvo moramo zagrijati, zatim držati na određenoj temperaturi da bi se dobila željena struktura po celom preseku i zatim hladiti na način kojim ćemo dobiti potrebnu kaljenu strukturu uz što manje deformacija i rizika da komad pukne u toku termičke obrade.

Problematika zagrevanja

Na slici 1 je dat izgled linije zagrevanja za slučaj kada se radni predmet stavlja u hladnu peć pa se zajedno sa peći vrši zagrevanje do zadate temperature kaljenja. Kod alatnih čelika posebno je važna problematika zagrevanja sa obzirom da se javljaju čelici veoma različitog hemijskog sastava, komadi različitih gabarita, težine i veoma razuđenih oblika. Po pravilu su to veoma skupi komadi, gde je udeo cene termičke obrade oko 3 do 5% u ukupnoj ceni izrade, a odgovornost za kvalitetan rad alata oko 80%. Treba takođe znati da nepravilno zagrevanje može dovesti do velikih deformacija, pa se mora potrošiti puno vremena na završnu doradu geometrije alata, a brušenje je veoma skupa vrsta obrade (što bitno povišava cenu alata). Nažalost, nepravilno zagrevanje kod krupnih alata, složene geometrije, može dovesti i do pucanja, a to je greška koja se ne može nikako popraviti i mora se po svaku cenu izbeći izborom adekvatne tehnologije.



ODNOS TEMPERATURE PEĆI, TEMPERATURE NA POVRŠINI I U JEZGRI KOMADA (shema)

Slika 6

- 1 temperatura peći
- 2 površina komada
- 3 jezgra komada
- T_z vrijeme zagrijavanja peći do temperature
- T_d vrijeme držanja peći na temperaturi
- T_p vrijeme zagrijavanja površine komada do temperature peći
- T_i vrijeme izjednačenja temperature po presjeku komada
- T_h vrijeme homogeniziranja strukture na datoj temperaturi
- T_o vrijeme određeno okom, kao vrijeme izjednačenja temperature komada
- T_z trajanje žarenja - vrijeme držanja poslije izjednačenja temperature određenog okom.

Brzina zagrevanja u principu treba da bude što veća da bi se skratila ciklus termičke obrade, koji je po pravilu duži od vremena potrebnog za mašinsku obradu alata. Prema dugogodišnjem iskustvu treba razlikovati:

1. **Tehničku brzinu zagrevanja** – koja zavisi od vrste uređaja u kojem se zagreva, temperature zagrevanja, rasporeda komada u peći, veličine šarže i td.
2. **Tehnološka ili dozvoljena brzina zagrevanja** – zavisi pre svega od vrste čelika, polazne strukture, oblika i razućenosti površine alata i td.

Vrste uređaja za zagrevanja koje se koriste kod termičke obrade alata su; komorne peći, sona kupatila, vakuumske peći i relativno ređe se koriste uređaji sa fluidizirajućim slojem ili uređaji za zagrevanje plazmom (samo kog plazma nitriranja).

Komorne peći po pravilu moraju imati zaštitnu atmosferu i većina savremenih uređaja ima prinudnu cirkulaciju unutar komore. Naravno da su tehničke mogućnosti brzog zagrevanja mnogo bolje kod ovih peći u odnosu na klasične komorne peći bez cirkulacije. Ovakve peći imaju i mnogo ravnomerniji raspored temperatura unutar šarže.

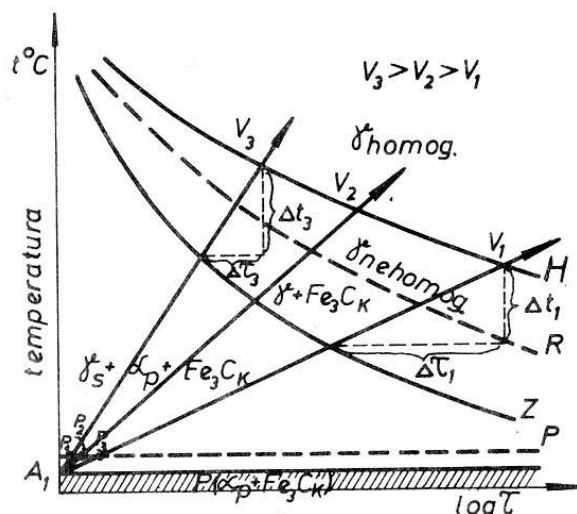
Sona kupatila su najbrža u pogledu zagrevanja, i do 5 puta brža od komornih peći, zavisno od temperature zagrevanja. Tu se posebno pažljivo mora voditi proces da ne dođe do havarije.

Vakuumska postrojenja su najsporiji tip uređaja, zato što se toplota na alat prenosi uglavnom zračenjem (zavisno od konstrukcije konkretne peći) ali je ovde jako važan način slaganja komada u šarži.

Same peći se po pravilu dele na :

- Niskotemperaturne – za rad do 700°C
- Srednjetemperaturne – za rad do 950 (1000°C)
- Visokotemperaturne – za rad preko 1000°C do 1300°C

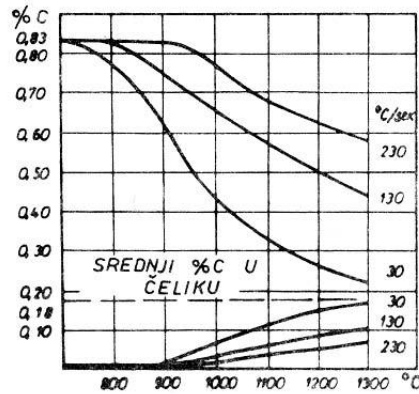
Od **radne temperature** suštinski zavisi tip grejača, konstrukcija peći, tip termoizolacije, vrsta termoparova, tip regulacije i td. Ta problematika će detaljnije biti obrađena u narednim poglavljima. Ovde je samo bitno napomenuti da se veoma retko alat direktno zagreva na radnu temperaturu (kaljenja), posebno kod visokolegiranih i masivnih komada. Po pravilu se koriste različite peći za prvi stepen zagrevanja, zatim za drugi i tek na kraju za treći stepen, ako je temperatura kaljenja oko 1250°C. Često se koriste i različite sredine (elektropeć i sona kupatilo) za zagrevanje jednog istog alata u toku kaljenja.



Brzina zagrevanja bitno utiče i na efekat austenitizacije čelika – slika 2.

Sl.2.

Na slici 2 brzina v_1 odgovara komornoj peći bez prinudne cirkulacije, brzina v_2 bi odgovarala peći sa prinudnom cirkulacijom atmosfere, a v_3 bi odgovaralo sonom kupatilu. Linija R odgovara momentu kada je cela polazna struktura postala austenit. Veoma je bitno uočiti da temperatura kaljenja kod bržeg zagrevanja mora biti višlja (za sono kupatilo) od temperature koju koristimo pri sporijem zagrevanju (komorna peć). Da bi so dobio homogeni austenit potrebno je još određeno vreme zagrevanja, koje zavisi takođe od brzine samog zagrevanja. Na slici 3 se vidi uticaj brzine zagrevanja na nehomogenost austenita.



Sl.3.

Raspored komada u jednoj istoj peći može da poveća trajanje zagrevanja i do 2-3 puta, kako je prikazano na slici 4. Naravno da se to odnosi na komornu peć i vakuumsku peć, dok kod sonih kupatila, zbog tipa prenosa toplote, raspored komada ima veoma mali uticaj.

Raspored komada D = 60	Vreme zagrevanja u h.	Raspored komada a = d = 60 mm.	Vreme zagrevanja u h.
	1,0		1,0
	1,0		1,4
	2,0		4,0
	1,4		2,2
	1,3		2,0
	1,7		1,8

Sl.4.

Velicina šarže takođe može bitno da utiče na vreme zagrevanja. Pri tome je bitno kolika je težina i alata i šaržera zajedno. Ako peć ima teorijski kapacitet šarže 500 kilograma, a šarža je teška svega 50 kg (naprimer imamo samo jedan alat koji mora hitno da se uradi), zagrevanje ide brže i šanse da dođe do greške (pukotine) su veće.

Hemijski sastav čelika je veoma bitan i posebno utiče na toplotnu provodljivost. Sa porastom sadržaja ugljenika i legirajućih elemenata smanjuje se toplotna provodljivost, pa je potrebno više vremena za zagrevanje. Alatni legirani čelici se moraju 1,5 do 2 puta sporije zagrevati od ugljeničnih čelika, ali to varira od čelika do čelika. Najveće razlike u koeficijentu toplotne provodljivosti javljaju se na nižim temperaturama (ispod 650°C), dok se iznad 850°C te razlike gube. Uveden je pojam – **C ekvivalent** – kao merilo osetljivosti čelika na pojavu prskotina pri termičkoj obradi (zagrevanju).

$$C_{ekv} = C + \frac{Mn}{5} + \frac{Cr}{4} + \frac{Mo}{3} + \frac{Ni}{10} + \frac{V}{5} + \frac{Si - 0,5}{5} + \frac{Ti}{5} + \frac{W}{10} + \frac{Al}{10}$$

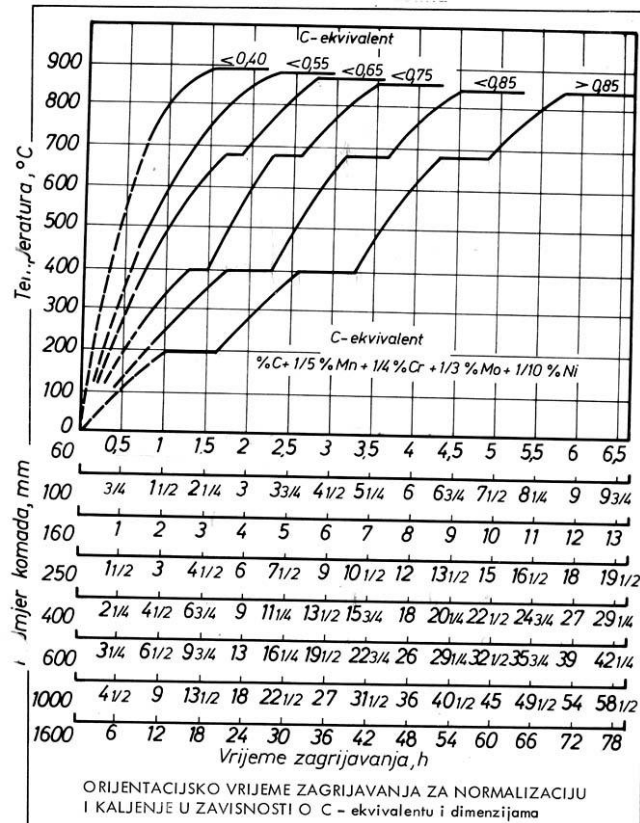
Formula vrijedi za slijedeća ograničenja maksimalnog sadržaja pojedinih elemenata:

C	≠ 0,9%	V	≠ 0,25%
Mn	≠ 1,1%	Si	≠ 1,8%
Cr	≠ 1,8%	Ti	≠ 0,5%
Mo	≠ 0,5%	W	≠ 2,0%
Ni	≠ 5,0%	Al	≠ 2,0%

Naravno da ovaj C ekvivalent ima ograničenja i pretsavlja neku orijentacionu vrednost, pošto se u industriskoj praksi mora uzeti u obzir uticaj načina prerade, polazne strukture i td na osetljivost prema brzom zagrevanju. Veoma je koristan grafikon preporučenih brzina zagrevanja i broja predgrevanja, koji je dat na slici 5. U obzir je uzeta i dimenzija radnog predmeta.

Polazna struktura pre zagrevanja može značajno da doprinese pojavi unutrašnjih napona, naročito ako je neravnomerna po preseku komada. Po pravilu, meko žareni čelici se mogu brze zagrevati jer imaju zrnasti perlit po celom preseku i veoma dobru žilavost. Komadi koji se kovani na toplo i imaju značajnu anizotropiju osobina u poprečnom i podužnom pravcu moraju se veoma polako zagrevati. Krupnoća zrna je takođe uticajna jer se fino-zrni čelik može brže zagrevato od grubozrnog.

Složenost oblika je izuzetno važan faktor za izbor adekvatnog režima zagrevanja. Brže se mogu zagrevati (a da ne puknu) komadi ravnomerne debljine i simetričnih glatkih površina, tipa valjka, ploče ili celindra. Međutim, alati po pravilu imaju neravnomerne debljine zidova i asimetričan oblik. Stvar se komplikuje ako su prisutni efekti koncentracije napona, kao pravougaoni otvori sa malim radiusom na prelasku površina iz jedne u drugu. To se rešava različito za svaki komad pojedinačno i za svaki tip zagrevanja. Postoji niz metoda empiričkog proračuna vremena zagrevanja, sa konkretnim primerima kod Pantelića – Tehnologija termičke obrade čelika I i II. Što je predavano na kursu Termička obrada I u toku drugog semestra studija.



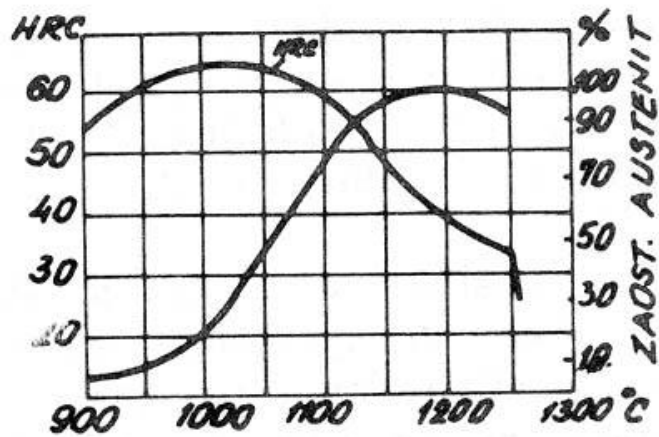
Sl.5.

Važna napomena:

Svaka kalionica u kojoj se rade skupi i komplikovani alati treba da ima poseban uređaj za kontrolu i praćenje temperature sa više kanala istovremeno. Ako se termopar 1 postavi na najtanji profil alata spolja, a termopar 2 na najdelje mesto alata i to u sredinu komada (ako je moguće – eventualno u otvor kanala za hlađenje vodom) tada će se dobiti vrednost ΔT koju možemo kontrolisati putem kompjuterskog programa. Kada ΔT pređe unapred zadatu vrednost, grejanje u peći se isključuje i sačeka se da se temperatura izjednači po preseku komada. Kada vrednost ΔT padne ispod određene veličine tada se ponovo uključuje grejanje peći. Ovde je samo bitno da se dobro odrede granične vrednosti i da se termoparovi dobro postave, pa ne može doći do greške i nikako do pucanja alata. Danas su takvi sistemi veoma rasprostranjeni i nemaju više posebno visoke cene, tako da su dostupni i malim kalionicama.

Izbor temperature kaljenja

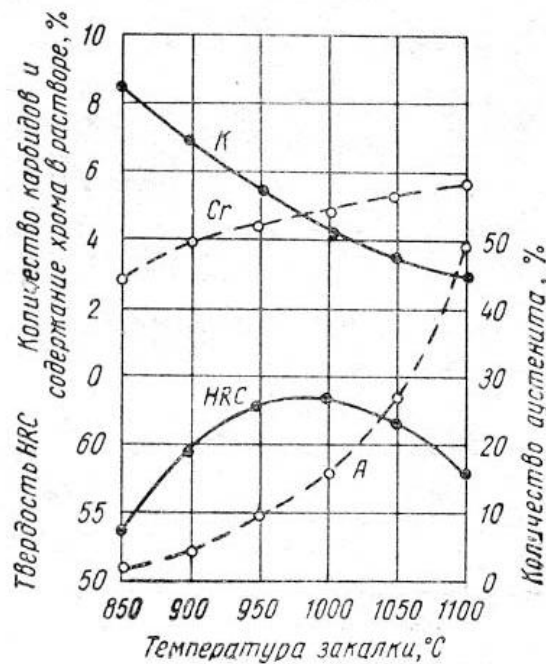
Kod alatnih čelika to je suštinski problem, pošto osobine kaljene strukture zavise od sadržaja legirajućih elemenata rastvorenih u austenitu pre kaljenja (početka hlađanja). Legirajući elementi mogu da formiraju različite karbide, ponekad i veoma složene, koji sadrže više legirajućih elemenata istovremeno. Neki se razlažu već pri zagrevanju iznad A_3 temperature, neki tek pri temperaturama oko 1000°C , poneki su stabilni i do 1250°C , ali postoje i primarni karbidi (na primer kod brzoreznih čelika) koji se ne rastvaraju pri zagrevanju za kaljenje. Stoga se temperaturom kaljenja suštinski menja kvalitet austenita, a samim tim i struktura (kao i osobine) nakon kaljenja. Na slici 6 je dat



Sl.6.

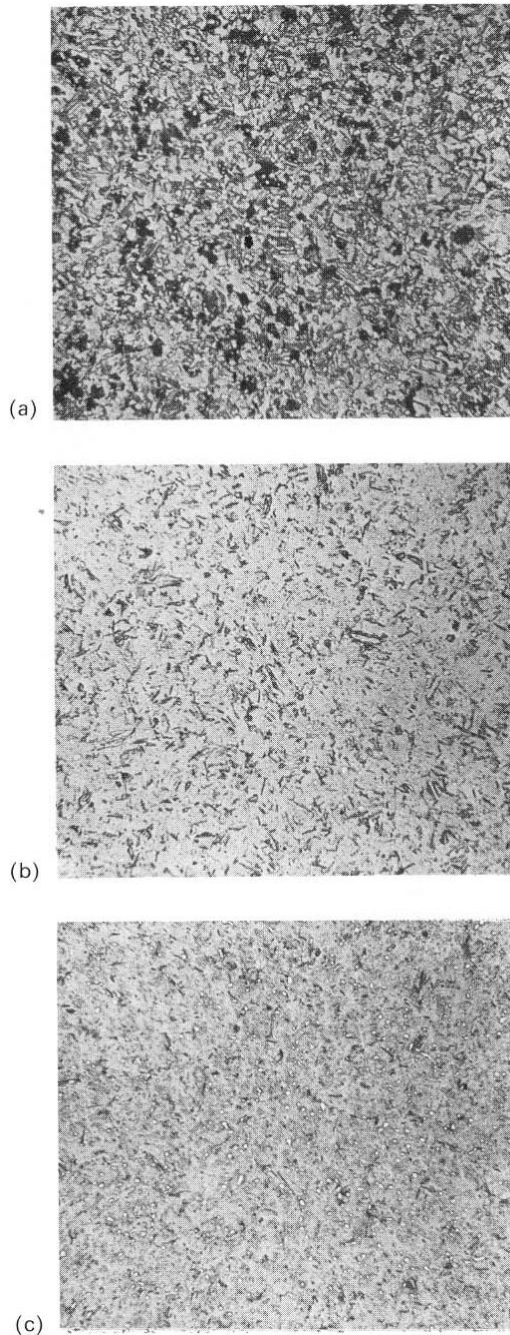
Grafikon na slici 6 ukazuje na dva vazna fenomena koji zavise od temperature kaljenja. Prvi je da postoji neka optimalna temperatura kaljenja pri kojoj se može postići maksimalna tvrdoća, za dati čelik. Međutim, sa povišenjem temperature, raste količina zaostalog austenita, što daje mogućnost da se alati kale na sekundarnu tvrdoću, odnosno da se dodato reguliše žilavost, toplotna postojanost i td.

Na slici 7 je dat izgled promene količine nerastvorenih karbida u austenitu (K) i promena sadržaja Cr u austenitu (Cr) u zavisnosti od temperature kaljenja. Dijagram važi za čelik sa ; 1,1%C ; 0,3%Mn ; 0,3%Si ; 6%Cr ; 0,5%V i 1,3%W. U donjem delu grafikona data je zavisnost tvrdoće kaljenja (HRC) i sadržaja zaostalog austenita (A).



Sl. 7.

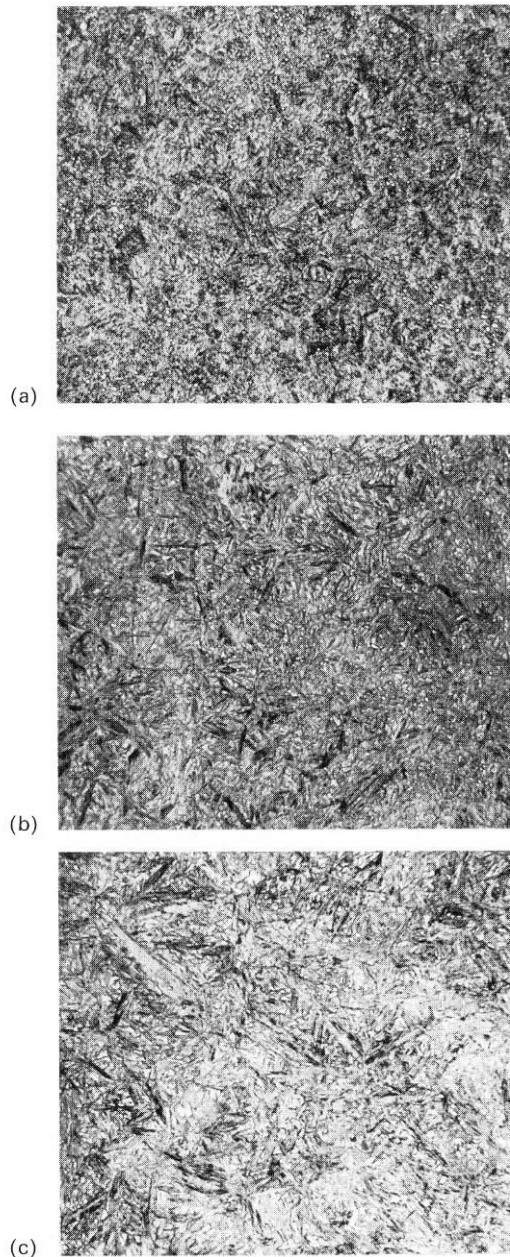
Na slici 8 je dat izgled strukture u zavisnosti od temperature kaljenja. (čelik SIS 2092 – za rad na hladno).



Sl. 8. 400x

Na slici 8a – data je struktura kaljena sa 800°C (55 HRC), slika 8b – struktura kaljena sa 825°C (61,5 HRC), dok je na 8c – struktura kaljena sa 850°C (66 HRC). Oдавde se vidi da je neophodno kaljenja sa minimum 850°C da bi se dobila potrebna tvrdoća alata.

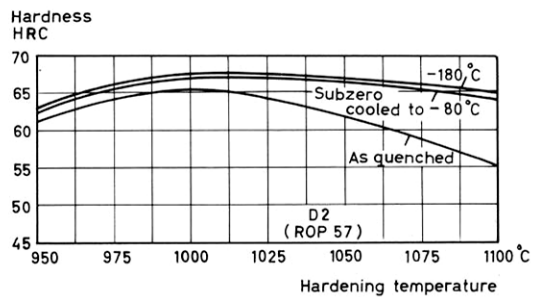
Na slici 9 dat je izgled strukture istog čelika ali sada kaljenog sa povišenih temperatura. Da bi se video uticaj na pojavu zaostalog austenita, uzorci su otpušteni na 200°C pa su stoga i rezultati tvrdoće nešto niži nego nakon kaljenja.



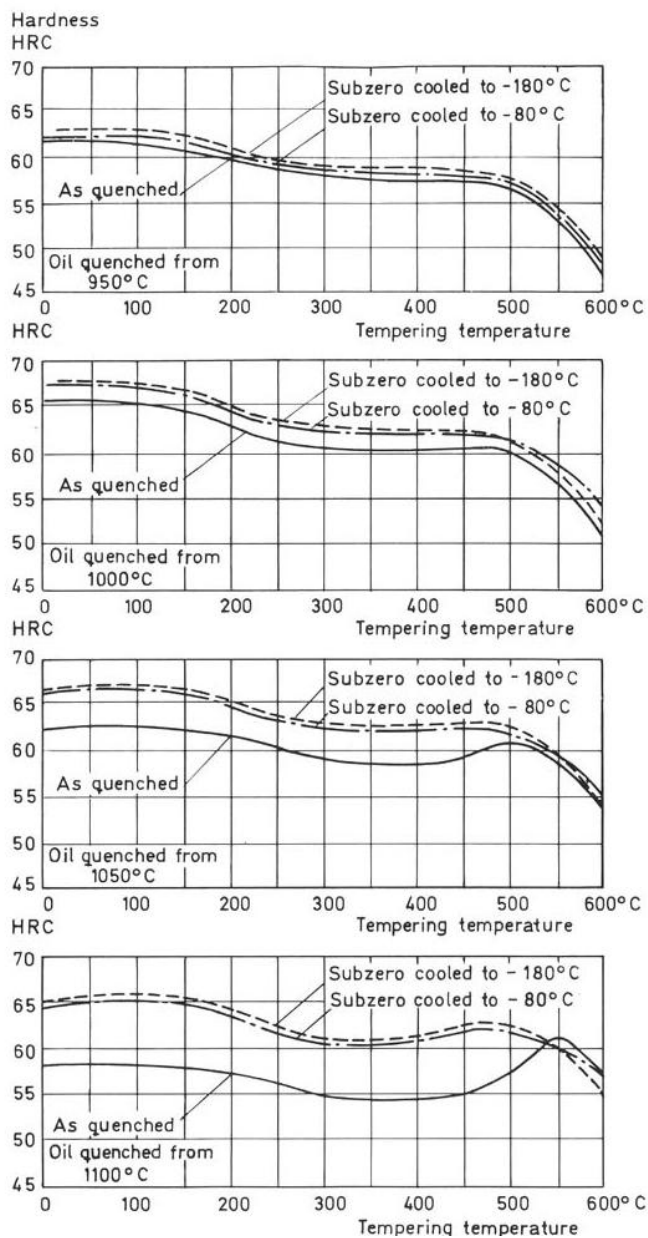
Sl. 9.

Na slici 9a – data je struktura kaljena sa 870°C (62.5 HRC i 12% A_z), slika 9b – struktura kaljena sa 920°C (62 HRC i 20% A_z), dok je na 9c – struktura kaljena sa 970°C (61 HRC i 28% A_z). Odavde se vidi da je neophodna primena naknadnog dubokog hlađenja ako se želi eliminirati zaostali austenit.

Efekat pojave povišenog sadržaja zaostalog austenita utiče jako na mehačke osobine čelika i alata. Posebno je problem snižene otpornosti na lokalni plastičnu deformaciju. Potrebno je stoga znati kako utiče temperatura kaljenja u kombinaciji sa tehnologijom dubokog hlađenja (na - 80°C i na -180°C). Na slici 10 dati su podatci o tvrdoći uzoraka čelika D2 kaljenog sa različitim temperatura i naknadno podvrgnutog dubokom hlađenju sa dve različite temperature dubokog hlađenja. Odavde se potpuno jasno vidi da pri korišćenju povišenih temperatura kaljenja moramo primeniti postupak dubokog hlađenja, ako se želi izbeći negativno dejstvo zaostalog austenita.



Sl. 10.



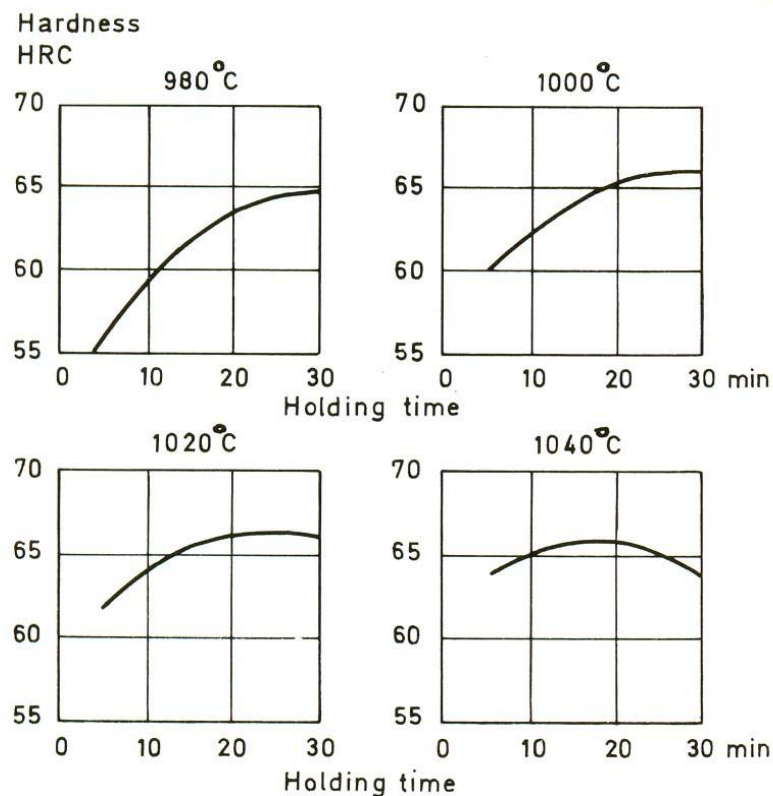
Sl.11.

Još bolja slika se dobija ako se posmatra veoma složen dijagram tvrdoća za isti čelik (D2) koji je kaljen u ulju sa različitih temperatura (950 – 1000 – 1050 i 1100°C) i zatim podvrgnut

dubokom hlađenju na minus 80°C , odnosno na - 180°C. Ti su uzorci bili otpušteni na različitim temperaturama i na slici 11 se jasno vidi da tvrdoće kod uzoraka kaljenih sa 950°C , gde nema bitne pojave zaostalog austenita, tvrdoća veoma malo zavisi od efekta dubokog hlađenja. Kod uzoraka kaljenih sa 1100°C pojavljuje se velika razlika u tvrdoći uzoraka samo kaljenih i uzoraka podvrgnutih dubokom hlađenju, sve do temperatura otpuštanja oko 500°C. Nakon toga, zbog raspada zaostalog austenita pri otpuštanju i efekata izlučivanja fino dispergovanih čestica, dobija se čak nešto višlja tvdoća kod uzoraka koji nisu duboko hlađeni (na 550°C).

Držanje na temperaturi kaljenja

Držanje na temperaturi kaljenja bitno utiče na efekte kaljenja pošto kod alatnih čelika po pravilu nije bitno koliko legirajućeg elementa ima u čeliku nego koliko ga ima rastvorenog u austenitu pre početka hlađenja (kaljenja). Što je višlja temperatura sa time se brže i potpunije rastvaraju legirajući elementi u austenitu, pa je dovoljno i kraće vreme držanja na temperaturi kaljenja – slika 12. Ovi grafikoni važe za čelik D2.



Sl. 12.

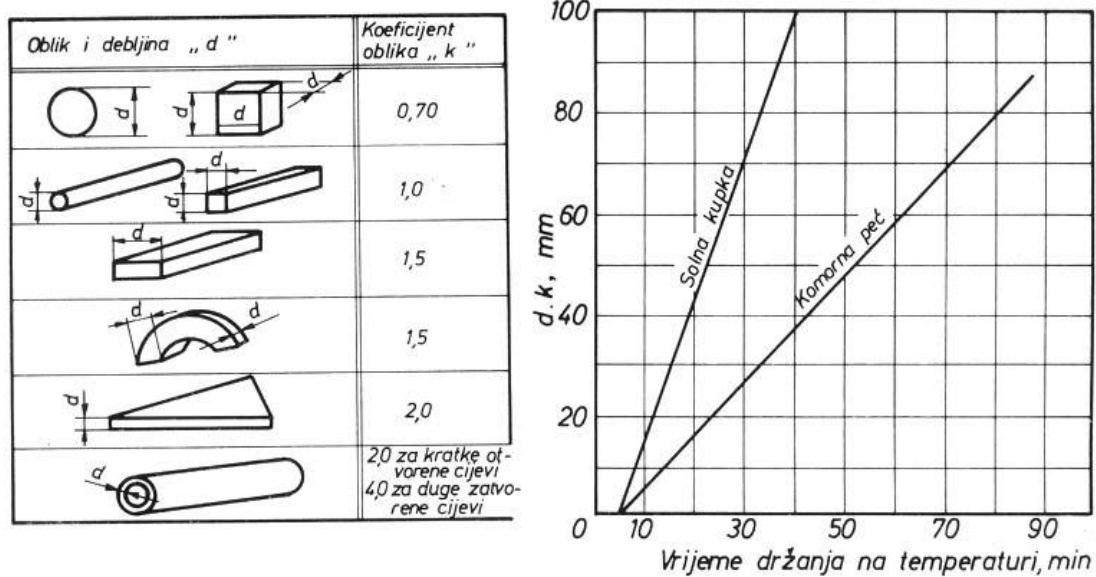
Nelegirani alatni čelici, koji sadrže samo najprostije karbide, dovoljno je držanje od 5 do 15 minuta, zavisno od dimenzija alata.

Kod srednje legiranih konstruktivnih čelika koristi se oko 15 do 25 minuta, zavisno od dimenzije. Postoje i dosta privučene preporuke da se koristi izraz:

$$20 + H / 2 = x \text{ (min)}$$

gde je H – karakteristična dimenzija komada u milimetrima. Ako je naprimer prečnik cilindra 50 mm dobija se x = 45 minuta, a ako je prečnik 300 mm – dobija se vreme držanja x = 170 minuta.

Često se koriste i pomoćne metode, kao kombinacija grafikona i empiričkih podataka. Jedan primer je dat na slici 13.



Sl. 13.

Možemo izvršiti grubo poređenje ove grafičke metode, gde bi za prečnik valjka 50 mm dobili držanje u trajanju od 53 minuta (ako se greje u komornoj peći) a malo pre se uz pomoć približne formule dobilo 45 minuta – što je ipak razumno mala razlika. Međutim sve ovo važi za konstruktivne čelike.

Kod alatnih čelika za rad na hladno poseban problem predstavljaju visoko hromni čelici, koji sadrže 12 % ili više hroma. Ovde se preporučuje držanje od 10 minuta kao minimum, ali ne više od 60 minuta kao maksimum. Treba još poštovati preporuku da zavisno od debljine koristimo 0,5 do 0,8 minuta po milimetru karakterističnog preseka alata. To se sve odnosi na komorne peći.

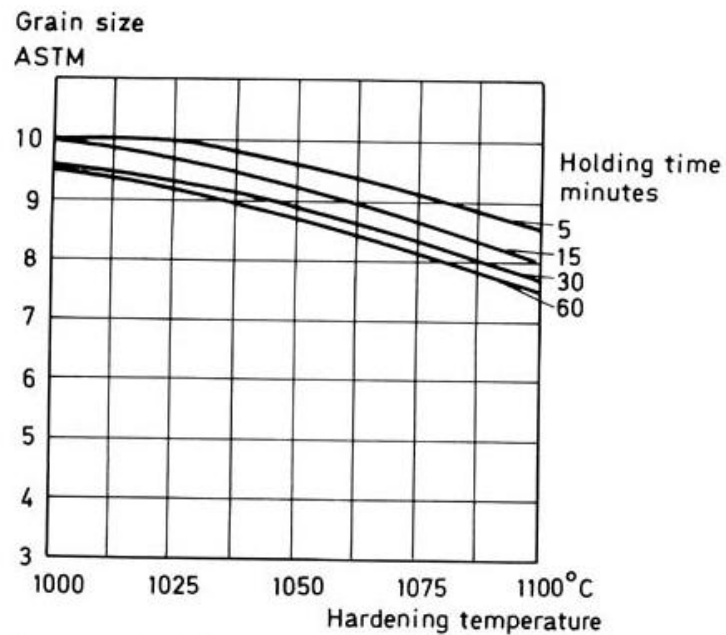
Kod čelika za rad na toplo, koji sadrže više legirajućih elemenata (Cr, W, V, Mo) i koji imaju veoma složene, teškotopljive karbide, preporučuje se zagrevanje na 1000 do 1040°C i trajanje držanja 20 do 30 minuta. Samo izuzetno, za komade ekstremnih preseka, može se koristiti trajanje do 60 minuta.

Kod brzoreznih čelika, retko se koriste komorne peći, već uglavnom se koriste sona kupatila. Tu se takođe koriste višestruka predgrevanja, naprimer trostruko, tako je potrebno zagrejati alat samo od zadnjeg predgrevanja (obično oko 1000°C) na temperaturu kaljenja (oko 1250°C). Ovde se javljaju trajanja zagrevanja u minutama. Tako naprimer, alati preseka do 10 mm zahtevaju držanje u soli svega 3 minute, a alati preseka 50 mm svega 7 minuta. Vremena držanja na temperaturi kaljenja se mere desetinama sekundi ili minut. Potrebno je veliko iskustvo da se izabere optimalan odnos vremena zagrevanja i temperature kaljenja pri termičkoj obradi brzoreznih čelika u solnim kupkama.

Predugo vreme držanja izaziva porast austenitnog zrna. Na porast austenitnog zrna utiče mnogo parametara, ali najbitniji su:

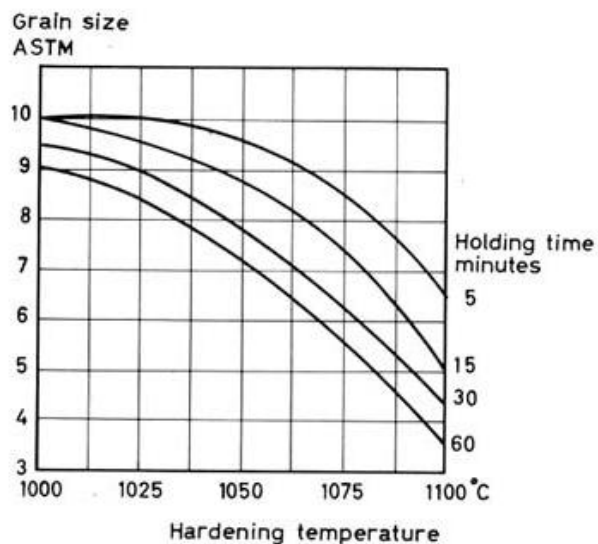
- Temperatura kaljenja
- Vrsta čelika – sadržaj legirajućih elemenata.
- Način proizvodnje čelika.
- Brzina zagrevanja itd.

Na slici 14 je data zavisnost krupnoće zrna u zavisnosti od temperature kaljenja i držanja na temperaturi kaljenja – za čelik za rad na tolu H13. Ovaj čelik je zbog visokog sadržaja legirajućih elemenata malo sklon pregrevanju, odnosno okrupnjavanju zrna.



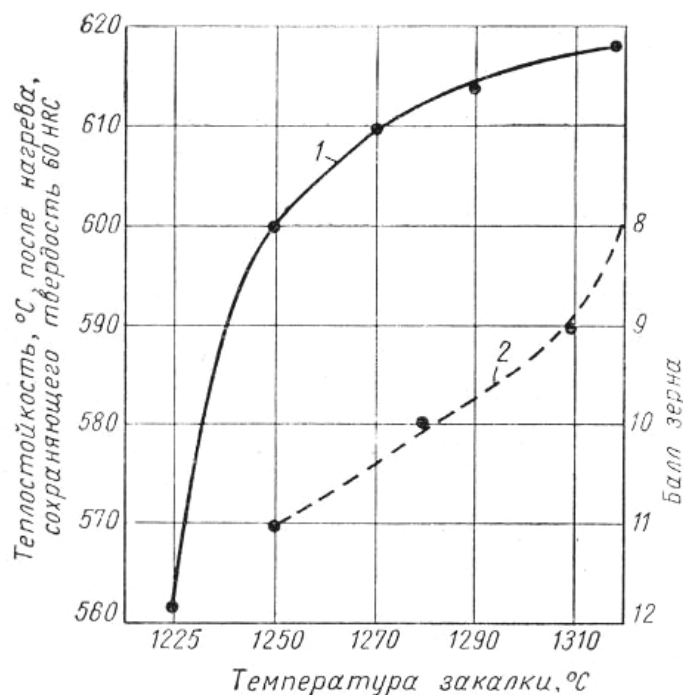
Sl. 14.

Na slici 15 dat je isti tip grafikona ali za čelik koji je veoma sklon okrupnjavanju zrna - čelik BH 10A.



Sl. 14.

Porast austenitnog zrna na temperaturi kaljenja u nekim izuzetnim situacijama može i da poboljša kvalitet alata, kao naprimer kod brzoreznog čelika, toplotnu postojanost – slika 15.



Sl. 15. Toplotna postojanost (1) i veličina zrna (2) – u zavisnosti od temperature kaljenja

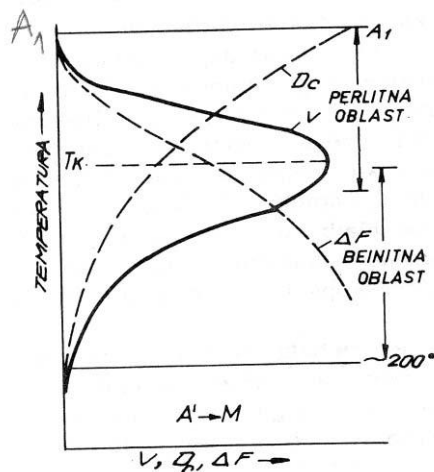
Problematika hlađenja

Transformacije austenita pri hlađenju mogu se vršiti putem difuzionih i bezdifuzionih mehanizama. Efekat samodifuzije atoma Fe u γ rešetki odvija do temperatura 600°C, a u rešetki α do približno 500°C. Istovremeno, difuzija atoma ugljenika u γ rešetki može se vršiti i do 100°C a u α rešetki do sobne temperature pa i niže. Difuzija legirajućih elemenata prestaje ispod 400°C.

Polazeći od opštih zakona faznih transformacija, koje ovde nećemo iznositi, pošto su poznate iz prethodnih kurseva, može se pojednostavljeno reći da su ovde prisutna tri procesa:

1. Transformacija površinski centrirane kubne rešetke γ u prostorno centriranu kubnu rešetku α . Proces se odvija do 500°C po difuzionom mehanizmu (postoji samodifuzija atoma Fe), a ispod te temperature po bezdifuzionom mehanizmu.
2. Izdvajanje atoma C po difuzionom mehanizmu iz prezasićene α rešetke, radi smanjenja do ravnotežne koncentracije – 0,02% na sobnoj temperaturi. Izdvajanje karbida je praćeno stvaranjem centara kristalizacije cementita.
3. Difuzija atoma C kako iz polazne faze (nerazloženi pothlađeni austenit), tako i iz novostvorene faze prezasićenog ferita. Ovaj proces dovodi do rasta novostvorenih centara kristalizacije.

Na slici 16 se jasno vidi da brzina razlaganja pothlađenog austenita ima jako naglašen maksimum na temperaturi T_k koja je obično 500°C. Razlika u slobodnoj energiji polazne faze pothlađenog austenita i novonastale faze - ΔF sve je veća što se ide na niže temperature pri hlađenju. Međutim, istovremeno jako opada koeficijent difuzije ugljenika – D_c što rezultuje izraženim maksimumom za vrednost brzine razlaganja austenita – v .

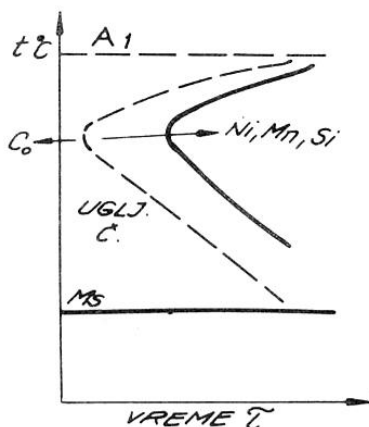


Sl. 16.

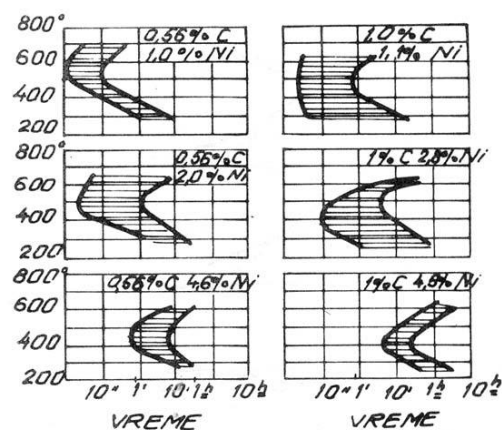
Kod alatnih čelika po pravilu se koristi legiranje, sa čime se suštinski utiče na procese razlaganja pothlađenog austenita pri hlađenju. Legirajući elementi utiču na proces razlaganja samo ako su rastvoreni u austenitu, pre početka hlađenja. Suštinski razlikujemo dve vrste uticaja:

- Elementi koji ne stvaraju karbide – Ni, Si, Mn i Co
- Elementi koji prave karbide – Cr, Mo, W, V i td.

Elementi koji ne prave karbide ne menjaju oblik TTT dijagrama nelegiranog čelika, ali pomeraju linije početka i kraja transformacije na način kako je dato na slici 17.



Sl. 17.

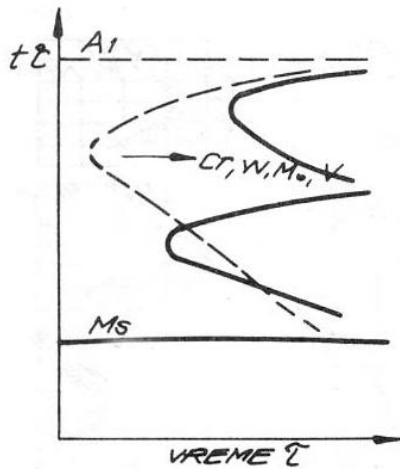


Sl.18.

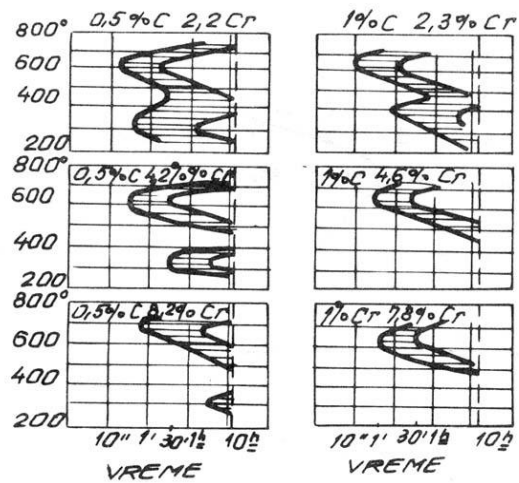
Na slici 18 date su promene u izgledu TTT dijagrama za čelik legiran hromom u zavisnosti od sadržaja ugljenika (0,56% ili 1,0% C). Jasno se vidi da je oblik linija sličan, ali se položaj početka transformacije bitno pomera udesno ako raste sadržaj Ni. Takođe se menja i temperatura na kojoj je brzina razlaganja najveća.

Elementi koji prave karbide menjaju suštinski oblik TTT dijagrama ali istovremeno pomeraju linije početka udesno, odnosno povećavaju inkubacioni period potreban da započne proces razlaganja. Na slici 19 dat je izgled uticaja karbidotvornih elemenata na TTT dijagram, gde se jasno vidi da se pojavljuju dve razdvojene oblasti sa dva izražena maksimuma. Jedan se

javlja negde oko 600 - 650°C i odgovara perlitnoj oblasti, dok se drugi maksimum javlja na temperaturama oko 300 - 400°C, što odgovara beinitnom području. Između ove dve oblasti javlja se temperaturna zona velike postojanost pothlađenog austenita.



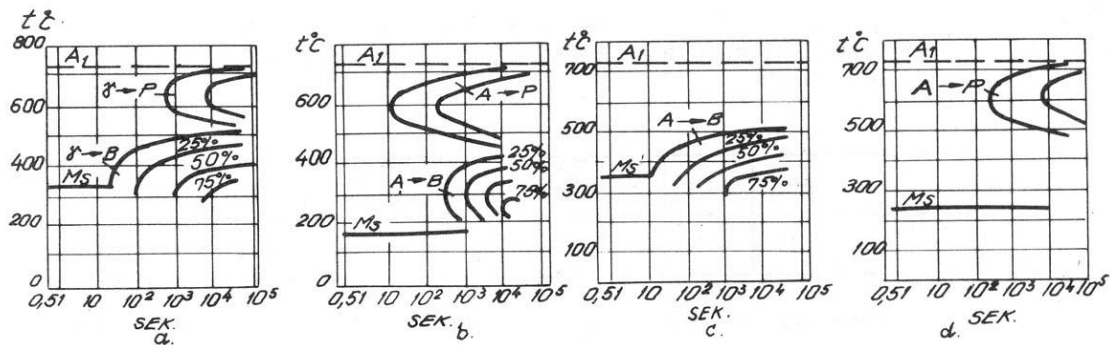
Sl. 19.



Sl. 20.

Na slici 20 se vidi izgled promene TTT grafikona za čelik legiran sa Cr, ali sa različitim sadržajem ugljenika (0,5% i 1,0%). Promenom sadržaja Cr i C menja se i oblik, ali i položaj linije početka i linije kraja fazne transformacije. Desno dole na slici 20 jasno se vidi da pri 1,0% C i 7,8% Cr nestaje u potpunosti beinitna oblast.

U zavisnosti od vrste i količine legirajućih elemenata, kao i od sadržaja ugljenika u čeliku, mogu se dobiti veoma različiti izgledi TTT grafikona kod čelika – slika 21.



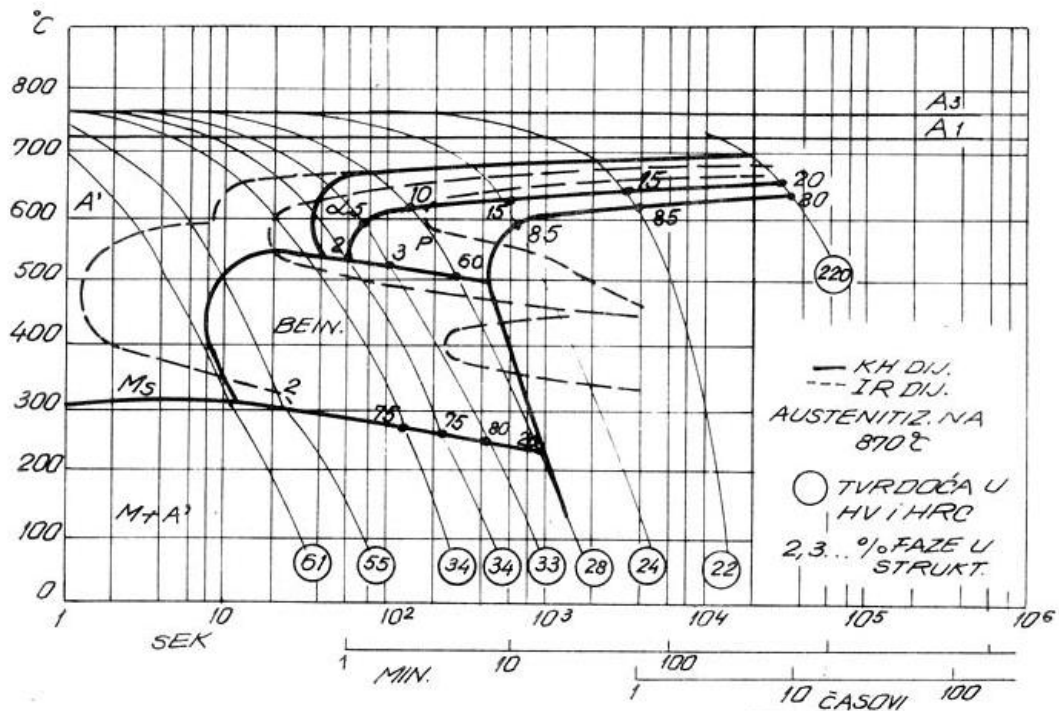
Sl. I.78. TTT dijagrami za razne legirane čelike: a - leg. konstruktivni čelik, b - alatni leg. čelik, c - visokolegirani konstruktivni čelik, d - visokohromni čelik.

Sl. 21.

Legirajući elementi utiču i na M_s liniju, kao i na M_f liniju. Intersticijski rastvoreni elementi, kao C i N utiču na snižavanje obe linije sa povišenjem udela u čeliku. Čelici sa više od 0,6% ugljenika imaju M_f ispod 0°C. Postoje formule kako se izračunava vrednost M_s linije zavisno od sadržaja C, Mn, Cr, Ni, Mo, Cu, Si ali su to samo statistički obrađeni empirijski podaci koji važe uz određena ograničenja. Potrebno je ipak znati da Al i Co dižu vrednost M_s dok Mn, Cr, V, Mo, Ni, i Cu spuštaju liniju M_s , a nabrojani su po intenzitetu uticaja (mn najače utiče).

Naravno da legirajući elementi utiču samo onoliko koliko je procentualno rastvoreno u austenitu pre početka hlađenja.

Iz svega što je prethodno rečeno, sledi da se ipak za svaki čelik mora imati tačan TTT dijagram, koji obično daju proizvođači čelika za svoj proizvod. Ovo je veoma važno, da bi se termička obrada alata mogla izvršiti na najbolji način. Na slici 22 je dat izgled TTT dijagrama za čelik 3830 na kojem su dati rezultati kaljenja (tvrdoća čelika) u zavisnosti od brzine hlađenja. Tvrdooća 61 HRC se dobija za kontinuirano hlađenje brzinom većom od kritične (kaljenje), dok se pri sporom hlađenju dobija feritno – perlitna struktura sa tvrdoćom od 22HRC ili 220 HB. Isprekidane linije označavaju linije transformacije pri izotermnom hlađenju.

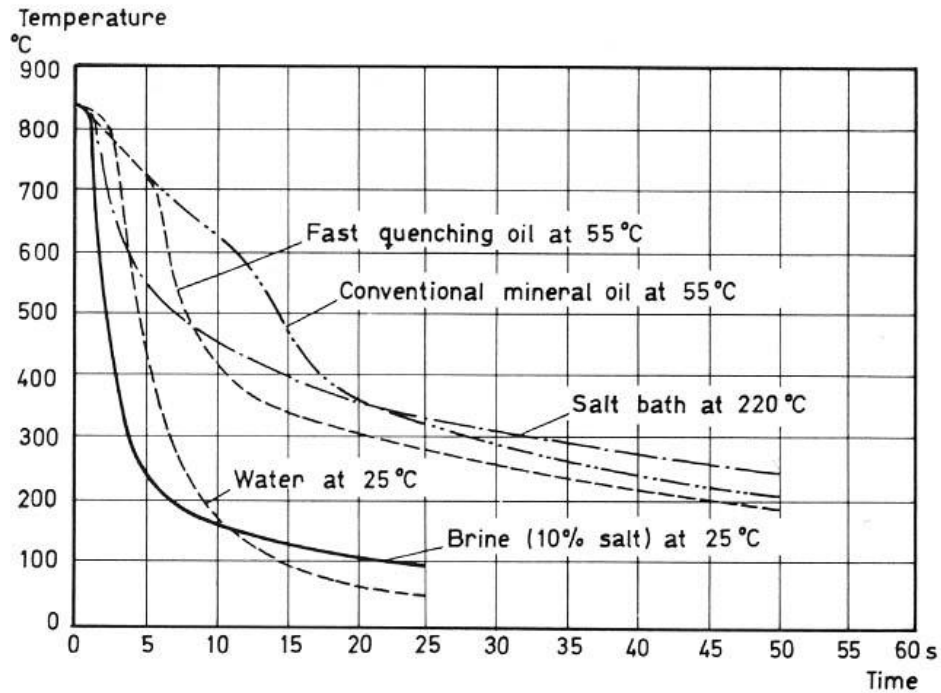


Sl. 22

Ako se zna zadata tvrdoća, odnosno koja struktura treba da se postigne, preostaje da se izabere potrebno sredstvo za hlađenje koje će obezbediti ntačno željenu brzinu hlađenja. Postoji veliki izbor sredstava za hlađenje:

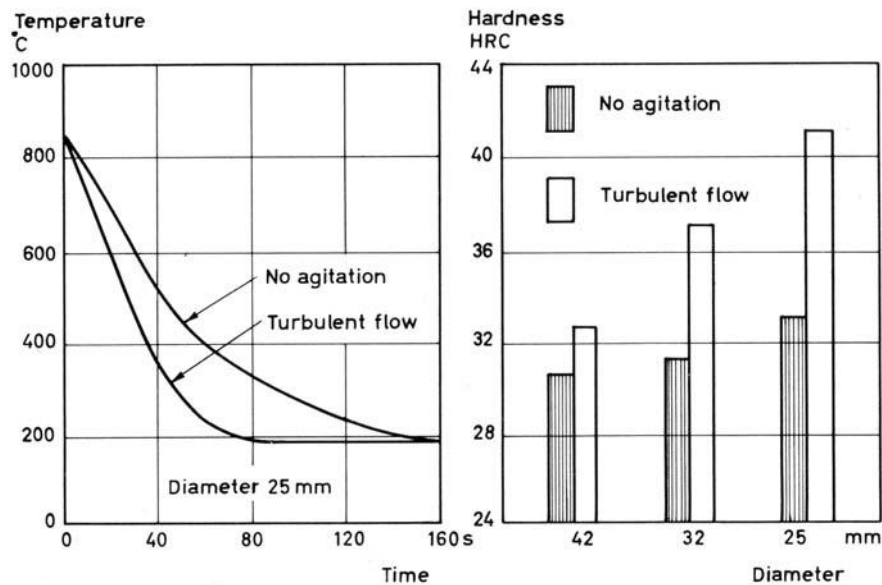
- Voda i razni rastvori vode
- Ulja za kaljenje
- Sona kupatila – izotermalno hlađenje
- Vazduh

Na slici 23 je dat grafikon koji ilustruje tok hlađenja u raznim sredinama, odnosno promenu temperature u centru epruvete prečnika 12,7 mm. Potrebno je uočiti da se linije rashladne sposobnosti ponašaju različito u različitim temperaturnim intervalima. Recimo, ulje za brzo kaljenje ima u intervalu 700 do 400°C veliku brzinu hlađenja, ali ispod 400°C naglo usporava hlađenje. To je pogodno kod alata složenih dimenzija a velikih preseka, pošto se smanjuju unutrašnji naponi u toku hlađenja, tako da se izbegava opasnost od pucanja alata.



Sl. 23.

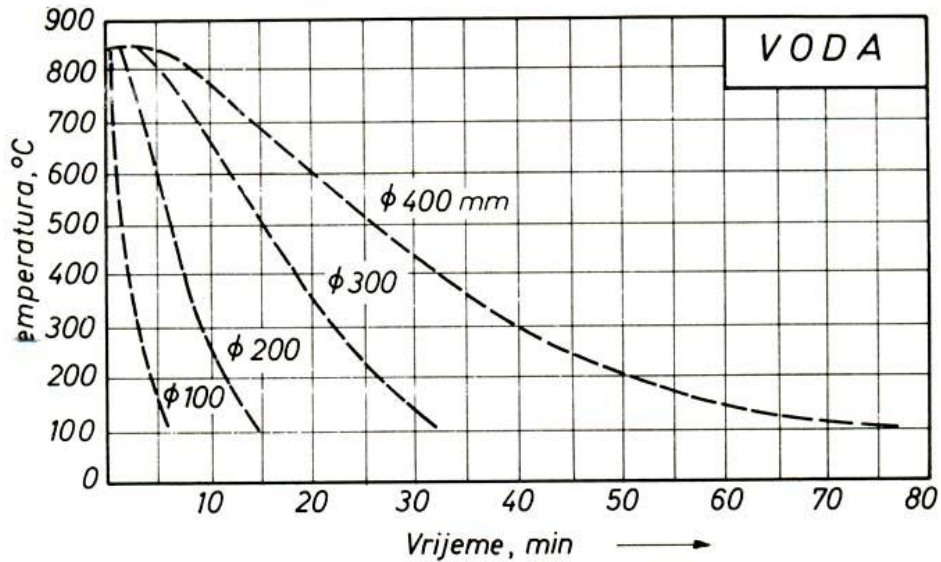
Alati po pravilu imaju veoma složen oblik, sa puno mesta u kojima može doći do formiranja parnih čepova pri kaljenju u vodi ili u ulju. Stoga veliku ulogu pri hlađenju ima agitacija, odnosno strujanje fluida u odnosu na površinu radnog predmeta. Time se izbegava formiranje «flekavih mesta» na površini alata pri kaljenju. Pod tim se podrazumevaju mesta sa različitom tvrdoćom (sniženom) na malim lokalitetima gde je duže vreme bio lociran parni čep.



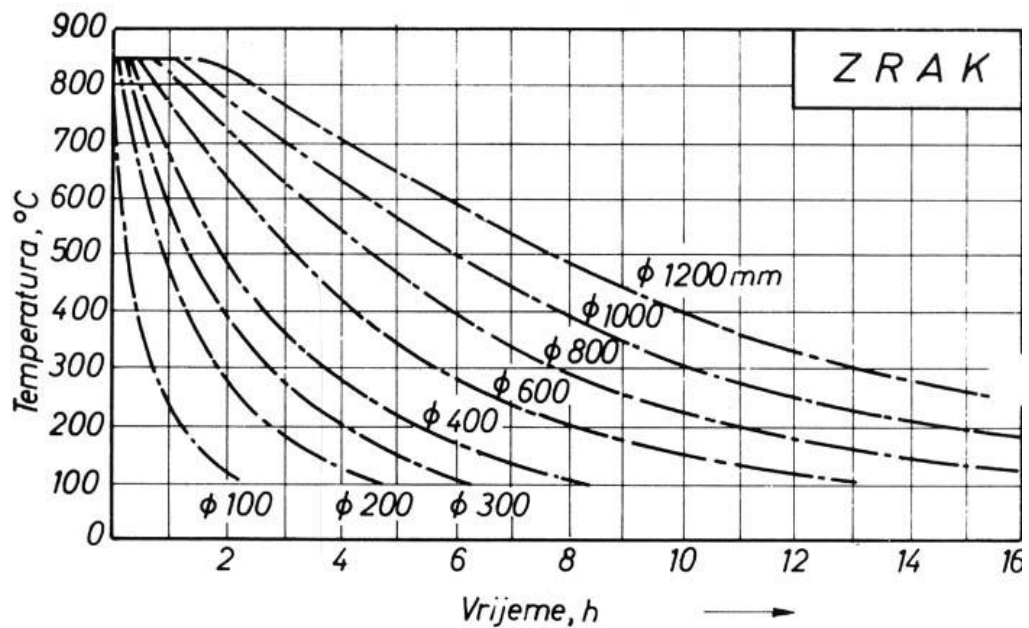
Sl. 23.

Međutim, agitacija menja brzinu hlađenja jednog istog fluida i do 2 – 4 puta, tako da bitno povećava opasnost od pucanja pri kaljenju. Na slici 23 je dat primer uticaja agitacije na primeru

sonog kupatila sa temperaturom 190°C. Na desnoj strani se vidi efekat promene tvrdoće pri hlađenju uzoraka od čelika Č1531 sa različitim dimenzijama uzoraka.



Sl. 24.

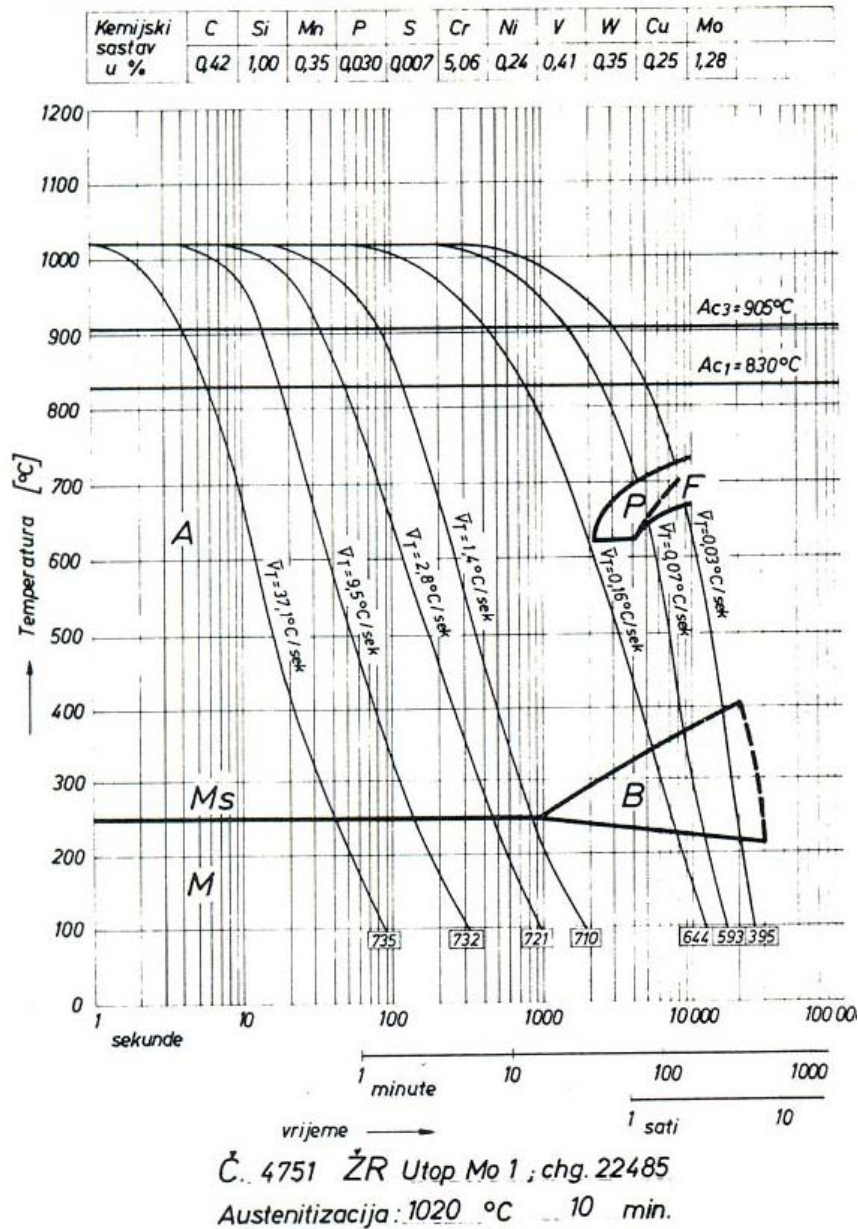


Sl. 25.

Na slici 25 su date linije hlađenja na mirnom vazduhu za komade različitih prečnika. Stoga se može zaključiti da alat malih dimenzija možemo često okaliti i hlađenjem na vazduhu, ali ako je alat od istog čelika velikih dimenzija (naprimera prečnika 1000 mm, tada moramo koristiti sredstvo sa mnogo većom brzinom hlađenja.

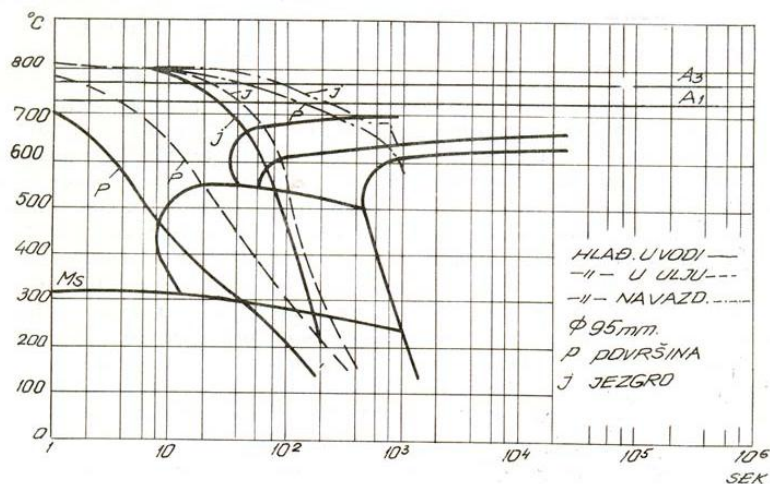
Na slici 26 je dat TTT dijagram za veoma popularan alatni čelik za rad na toplo. Ovaj čelik se puno koristi za alate za livenje pod pritiskom, ali se mnogo koristi i kod alata i mašina za

preradu plastike. Na dijagramu se jasno vidi da je najmanja brzina hlađenja neophodna za potpunu martenzitnu strukturu (bez beinita) – $V = 1,4 \text{ }^\circ\text{C/sec}$. To je brzina koju obezbeđuje hlađenje na vazduhu ali za komade manjih dimenzija (ispod 50 mm u preseku). Deset puta manja brzina hlađenja – $V = 0,15^\circ\text{C/sec}$ će obezbediti visoku tvrdoću, ali bez formiranja perlitno – feritne strukture. To znači da se i komadi sa debljinom zidova do 150 mm mogu okaliti na vazduhu, ali uz prisustvo manje količine beinita. Naravno da ovde praktično nema rizika od pucanja alata prikaljenju.

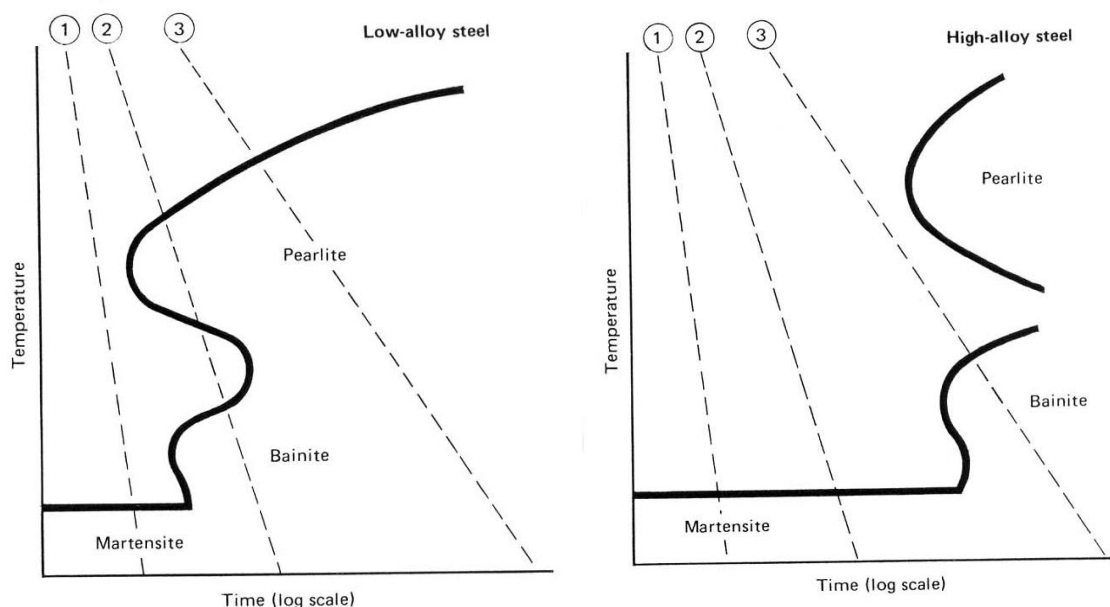


Sl. 26.

Na slici 27 dat je primer rezultata hlađenja uzorka od čelika 3830 sa prevelikim dimenzijama (prečnik 95 mm), koji se ne može okaliti na martenzit čak ni kada se hladi sa vodom. Jednostavno nije dovoljno prokaljiv, odnosno nije dovoljno legiran za taj presek radnog predmeta.



Sl. 27. Rezultati termičke obrade nakon hlađenja u vodi, ulju i na vazduhu.



Sl. 28. Rezultati koji se dobijaju hlađenjem u vodi (1), ulju (2) i na vazduhu (3) kod niskolegiranih (levo) i visokolegiranih (desno) čelika.

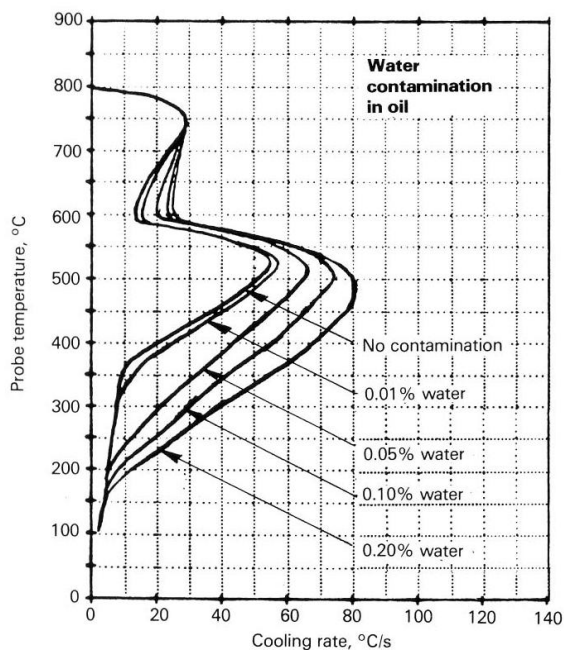
Prethodni grafikoni jasno pokazuju da se kod svakog alatnog čelika obavezno mora znati TTT dijagram, dimenzije uzorka i tek tada se vrši izbor sredstva za hlađenje. U tabeli T – 1. je dat pregled brzina hlađenja nekih uobičajenih sredstava za hlađenje, naravno samo orijentacione vrednosti.

Posmatrajmo samo ulje za kaljenja. Postoji više vrsta ulja za kaljenja, koja se razlikuju po brzini hlađenja. Međutim kod ulja za kaljenje, veliki uticaj može imati i određena kontaminacija ulja sa vodom. Ova voda može poticati od kondenzacije na hladnim zidovima uređaja. Na slici 29 dat je grafikon brzina hlađenja ulja zavisno od sadržaja vlage.

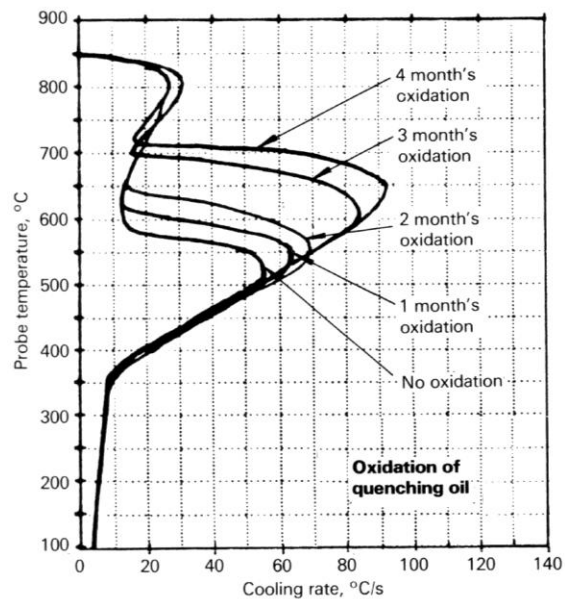
Kod ulja takođe može doći do bitnih promena u brzini hlađenja, ako se ulje intenzivno koristi i trpi stalne termo šokove (nastale pri uraranju usijane šarže). Na slici 30 je dat izgled promena brzine hlađenja ulja u zavisnosti od vremena eksploatacije. Nameće se zaključak da ulje obavezno treba stalno obnavljati i da treba striktno kontrolisati sadržaj vode.

Tabela 1.

Sredstvo za hlađenje	Brzina hlađenja ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)
Miran vazduh	50 - 80
Azot (1 bar)	100 - 150
Sono kupatilo	350 - 500
Azot (10 bara)	400 - 500
Helijum (10 bara)	550 - 600
Helijum (20 bara)	900 - 1000
Ulje (mirno)	1000 - 1500
Vodonik (20 bara)	1250 - 1350
Ulje sa cirkulacijom	1800 - 2200
Vodonik (40 bara)	2100 - 2300
Voda sa cirkulacijom	3000 - 3500



Sl. 29

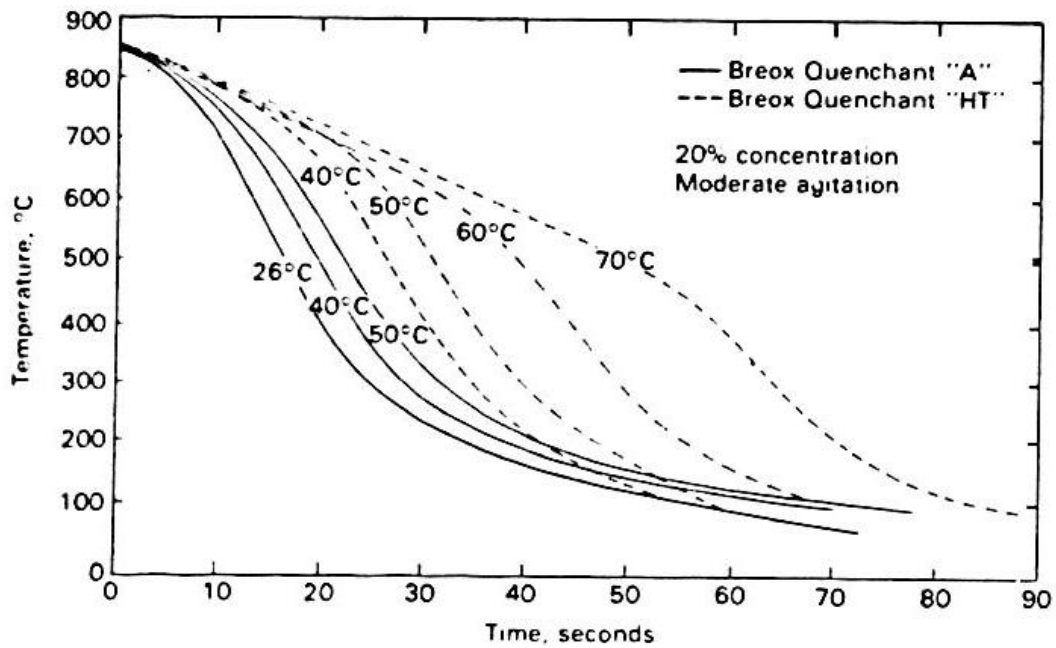


Sl. 30.

Kada se u kalionici kale čelici koji zahtevaju različite brzine hlađenja, a ne želi se prisustvo uljnih kupatila koja emituju ogromnu količinu zagušljivih i štetnih gasova, tada se mogu koristiti emulzije polimera sa vodom. Brzina hlađenja se reguliše izborom vrste polimera, sadržajem u vodi, brzinom agitacije fluida i temperaturom kupatila. Na slici 31 je dat prikaz uticaja temperature kupatila i vrste polimera (A i HT) – a sadržaj je bio 20% i nije bilo agitacije. Jasno se vidi da se sa podizanjem temperature usporava brzina hlađenja i to posebno na nižim temperaturama radnog predmeta.

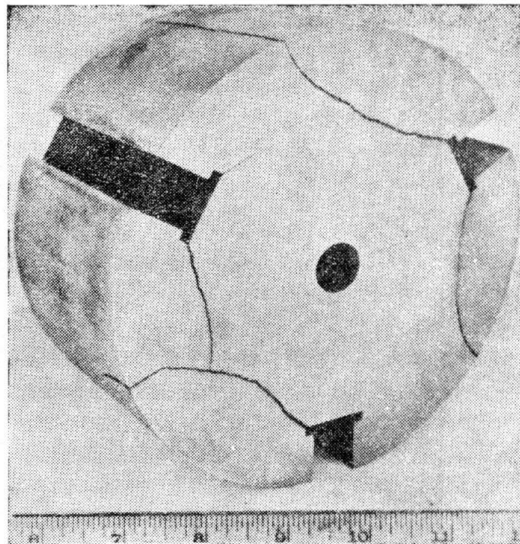
Loša strana ovoga je problem održavanja konstantne temperature u kupatilu i posebno konstatnog udela polimera u vodi.

Voda se mnogo lakše isparava pa se vremenom menja procentualni udeo polimera. Stoga treba često meriti i kontrolisati brzine hlađenja, a to zahteva posedovanje adekvatnog uređaja u kalionici.



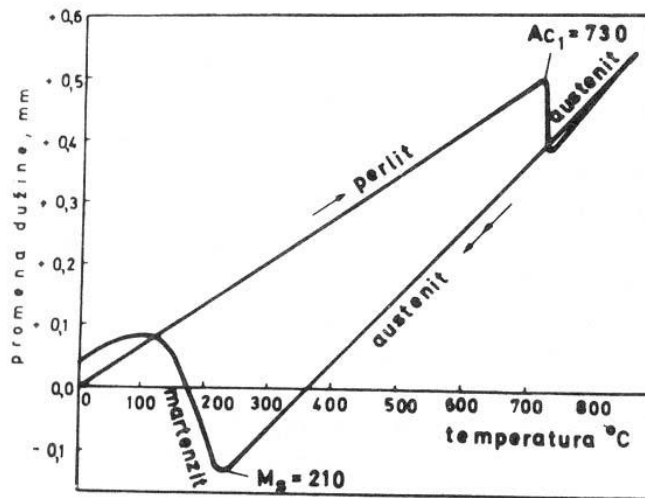
Sl. 31.

Ključni problem prilikom kaljenja alata je da se izabere što manja brzina hlađenja, a da se pri tome dobije željena struktura. Što manja brzina hlađenja je potrebna da ne bi došlo do pojave pucanja alata u toku samog kaljenja – slika 32.



Sl. 32.

Prilikom zagrevanja i hlađenja uzorak trpi velike promene u pogledu prirasta ili smanjenja dimenzija – slika 33. Jasno se vidi da se nakon kaljenja pojavljuje prirast dimenzija na sobnoj temperaturi.



Sl. 33. Dilatometrijska linija za čelik sa 0,9% c.

Prirast dimenzija jako zavisi od vrste čelika, sadržaja legirajućih elemenata, sadržaja ugljenika i specifičnosti oblika, kao i gabarita predmeta. Na slici 34 je dat grafički prikaz prirasta dimenzija kod kaljenih alatnih čelika (sa 12% Cr), zatim kod srednje legiranog čelika za poboljšavanje i kod ugljeničnog čelika.

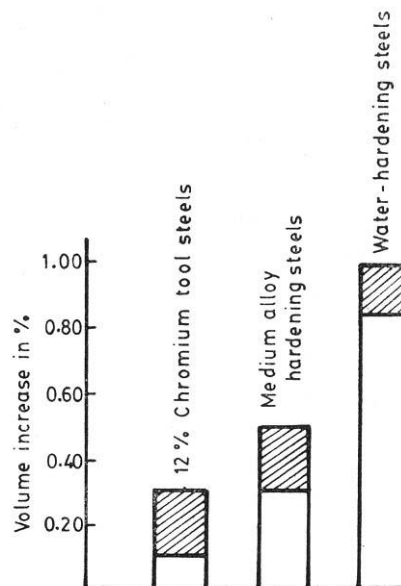


Fig. 2.55 Typical volume change in hardened steels⁷⁶

Sl. 34.

U tabeli T-2 dat je pregled prirasta dimenzija nakon kaljenja kod nelegiranog čelika, zavisno od sadržaja ugljenika.

Tabela T – 2.

Sadržaj C u čeliku	Povećanje zapremine u %
0,4	0,40
0,6	0,46
0,7	0,85
0,8	1,13
1,2	0,90

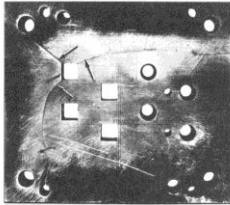


Fig. 1. Blanking die, 10 by 12 in., and made of a manganese oil-hardening tool steel (O1), that cracked through sharp corners of an opening (arrows) during heat treatment

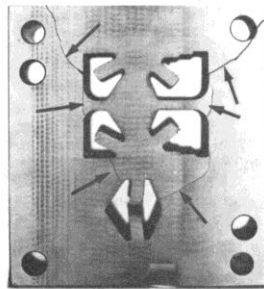


Fig. 4. Blanking die, 10 by 10 in., and made from D2 tool steel, that failed in service by cracking (arrows indicate cracks). Failure was attributed to thin-wall sections, close spacing of holes, abusive grinding, and improper electrical discharge machining.

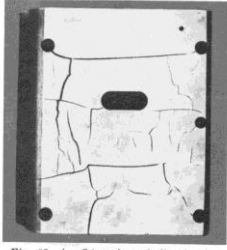


Fig. 10. An O1 tool steel die showing deep cracks that resulted from abusive grinding

