

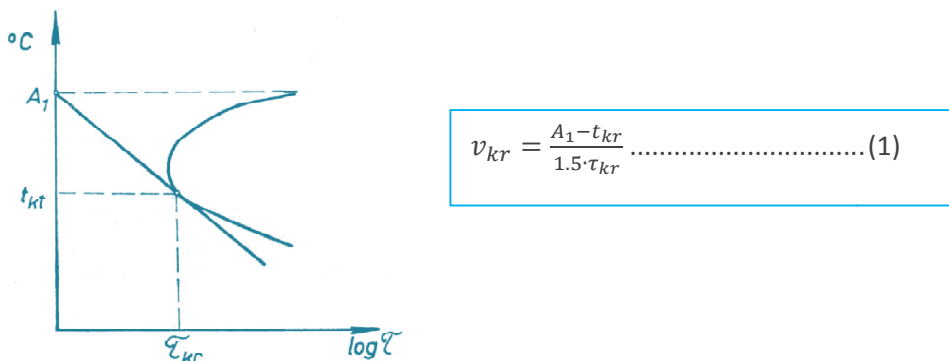
VEŽBA 3 - HLAĐENJE

Kao i zagrevanje, hlađenje pri termičkoj obradi je važna tehnološka operacija pa se za sve vidove termičke obrade propisuje određeni način i brzina hlađenja. Hlađenje može da se odvija **neprekidno (kontinualno)** od temperature termičke obrade do temperature sredstva za hlađenje ili **izotermalno** - podrazumeva brzo hlađenje do određene temperature, zadržavanje na toj temperaturi i završno hlađenje do sobne temperature.

Prema brzini kojom se ono vrši razlikuju se sledeće vrste neprekidnog hlađenja:

- **sporo** - najčešće se odvija u zatvorenoj peći;
- **normalno** - hlađenje na mirnom vazduhu - odgovara uslovima hlađenja čeličnih polufabrikata posle obrade plastičnim deformisanjem na toplo. U ovom slučaju brzina hlađenja nije određena i zavisi od veličine i oblika komada;
- **brzo** - najznačajnije hlađenje – kod kaljenja treba da omogući brzinu hlađenja veću od kritične brzine hlađenja ($v > v_{kr}$) kako bi se obavila transformacija austenita u martenzit.

Kritična brzina hlađenja zavisi od vrste čelika, ali i od veličine i oblika komada. Ista se može odrediti iz TTT dijagrama, a definiše se izrazom:



Slika 1: Definicija kritične brzine

Hlađenje se može odvijati na dva načina:

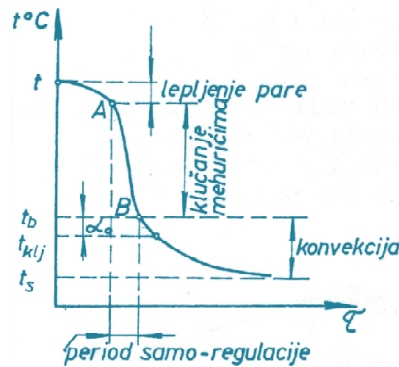
- **konvekcija bez faznih promena** - čista konvekcija bez faznih promena javlja se pri hlađenju u sredstvima koja na prolaze kroz promene agregatnog stanja u toku hlađenja. To su sredstva čija temperatura promene agregatnog stanja izlazi van intervala radnih temperatura. U ovu grupu sredstava za hlađenje ubrajaju se rastopi soli, rastopljeni metali i gasovi.
- **konvekcija sa faznim promenama** - javlja se u slučaju hlađenja u rashladnim sredstvima čija je temperatura promene agregatnog stanja između temperature termičke obrade (kaljenja t_k) i radne temperature sredstva za hlađenje t_s . Takva sredstva su voda i ulje kod kojih je temperatura ključanja u intervalu radnih temperatura.

Ukoliko se hlađenje odvija *konvekcijom bez faznih promena* (na vazduhu, u sonom kupatilu) moguće je odrediti temperaturno polje unutar komada koji se hladi, za svaki trenutak vremena, na sličan način kao u slučaju zagrevanja. Koristi se kriterijalna jednačina:

$$\phi = \frac{t - t_{ok}}{t_o - t_{ok}} = F \left(Bi, Fo, \frac{x}{X} \right) \dots\dots\dots (2)$$

Stoga se za određivanje vremena hlađenja (brzine hlađenja), kao i temperatura pri hlađenju mogu koristiti iste linije za funkciju F za temperature površine i jezgra komada koje se koriste pri zagrevanju.

Međutim, kaljenje kao jedan od najznačajnijih postupaka termičke obrade, najčešće se vrši u vodi i ulju, čije tačke ključanja padaju u radnu oblast pri hlađenju. U tom slučaju ne može se koristiti analitička metoda jer je fizički proces prenošenja toplote složeniji nego u slučaju konvekcije bez faznih promena. Tada se tok procesa hlađenja se najbolje može pratiti snimanjem **krivih hlađenja** (slika 2).



Slika 2: Karakteristična linija hlađenja

U slučaju hlađenja u sredstvima koja menjaju agregatno stanje javljaju se tri perioda hlađenja:

- **Period lepljenja pare** - Od početka hlađenja do tačke A pad temperature je veoma spor. Posledica ovoga je stvaranje parnog omotača (*Lajdenfrostov efekat*) na površini komada koji predstavlja toplotni izolator što umanjuje intenzitet daljeg hlađenja. Od velikog je interesa da period odvođenja toplote lepljenjem pare bude što kraći ili da uopšte ne postoji, jer baš od početka hlađenja zavisi da li će kriva hlađenja seći liniju početka transformacije na kritičnom mestu ili neće. Dužina perioda lepljenja pare zavisi od:
 - *vrste rashladnog sredstva* - u vodi mora biti što manje rastvorenih gasova, jer isti potpomažu lepljenje pare. Stoga se najčešće koristi ustajala voda ili voda sa rastvorenim solima. Najpovoljnije sredstvo za hlađenje je vodeni rastvor soli sa 10-12% soli;
 - *temperature rashladnog sredstva* – što je viša to je period lepljenja pare duži;
 - *oblika i veličine komada koji se kali*;
 - *načina potapanja komada u kadu* – za svaki oblik bira se najpovoljniji položaj za hlađenje, za šta je potrebno praktično iskustvo.
- **Period ključanja sa mehurima** - Od tačke A do B sledi veoma brz pad temperature, a toplota se odvodi sa površine uz intenzivno ključanje tečnosti. Ovaj period odlikuje se intenzivnim odvođenjem toplote koji zavisi od brzine odlepljivanja mehurića (voda ima bolje odvođenje toplote od ulja jer se kod vode mehurići lako odlepljuju). Velika brzina hlađenja u ovom periodu izaziva velike temperaturne razlike u komadu, ali bez štetnog uticaja jer još nije dostignuta temperatura početka martenzitne transformacije tako da će veoma žilav austenit lako umanjiti unutrašnje napone lokalnim deformisanjem. Stoga je veoma važno za rashladno sredstvo da temperatura t_b bude iznad temperature početka martenzitne transformacije M_p kako bi se hlađenje obavilo sa što manje unutrašnjih napona. Tačka B bi trebalo teorijski da se uspostavi kada temperatura površine komada dostigne temperaturu ključanja rashladnog sredstva. Međutim, t_b je nešto viša od t_{kij} za vrednost α_0 koja se naziva nadgrevanje.
- **Period konvekcije** - Dalje odvođenje toplote ispod tačke B pa sve do izjednačavanja temperature komada sa temperaturom rashladnog sredstva odvija se konvekcijom.

Sredstva za hlađenje

Dva najvažnija sredstva za hlađenje su voda i ulje. Voda ima veću brzinu hlađenja i koristi se za kaljenje ugljениčnih čelika dok se ulje koristi za kaljenje čelika sa manjim kritičnim brzinama hlađenja (legirani čelici). Kao sredstva za hlađenje koriste se:

- **voda i vodeni rastvori** - za ugljениčne i niskolegirane čelike
- **ulje** - za srednje legirane čelike
- **topla kupatila sa solima** - za stepenasto kaljenje i izotermno poboljšavanje
- **gasovi (vazduh ili zaštitni gasovi)** - za brzorezne čelike
- **hladne metalne ploče** - deluju dodirom, koriste se za tanke komade sklone deformisanju.

Ulje

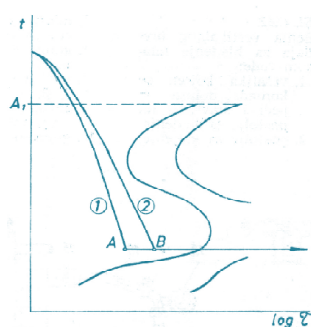
Koriste se uglavnom mineralna ulja. Uglavnom imaju istu specifičnu toplotu, tačku ključanja, toplotu isparavanja, toplotnu provodljivost, dok se značajno razlikuju po viskozitetu i temperaturi paljenja. Porast viskoziteta povećava temperaturu ključanja što smanjuje nastajanje pare u periodu ključanja ali i smanjuje sposobnost hlađenja konvekcijom jer smanjuje mogućnost turbulencije ulja. Najpovoljnije ulje je sa viskozitetom 4.5°E (Engler) na temperaturi od 50°C. Ulje sa većim viskozitetom lepi se za komad.

Voda i vodeni rastvori

Za kaljenje je najpovoljnija ustajala voda zbog male količine rastvorenih gasova. Voda se koristi do 50°C jer iznad te temperature period lepljenja pare traje dugo, pa je kaljenje onemogućeno. Bolji uslovi hlađenja postižu se vodom u kojoj je rastvoreno 10% kuhinjske soli. Mogu se koristiti i druge soli, kao što je CaCl, koje imaju povoljno hemijsko dejstvo na površinu (skidanje oksidnog sloja sa komada). Svi ovakvi dodaci podižu graničnu temperaturu primenjivosti vode za kaljenje.

Topla kupatila sa solima

Koriste se za hlađenje delova pri izotermnom kaljenju ili izotermnom poboljšavanju legiranih čelika, odnosno kod čelika sa manjom kritičnom brzinom hlađenja. Kod izoternog kaljenja ili otpuštanja neophodno je dovoljno brzo hlađenje do temperature izoterme tako da linija hlađenja ne dodiruje liniju početka transformacije.



Slika 3: Primer izoternog hlađenja

Hlađenje mlazom

Hlađenje mlazom kod površinskog kaljenja je redovna praksa zbog vrlo intenzivnog hlađenja, velike mogućnosti regulisanja brzine hlađenja i mogućnosti primene pogodnih pribora za manipulisanje procesa hlađenja.

Na donjoj slici prikazan je uticaj izbora sredstva za hlađenje na fazni sastav ugljeničnog čelika. Za prikazan slučaj potpuno marteniztna struktura nastaje samo u slučaju hlađenja u slanoj vodi i ulju sa aditivima.

