

Tekoča kalilna sredstva, opis in kontrola

V članku je iz literature zbran pregled o lastnostih tekočih ohlajevalnih sredstev (voda, raztopine in olja) s stališča ohlajevalnih sposobnosti in uporabnosti. Podana je kritična ocena posameznih skupin in napotki za orientacijo pri izbiri teh sredstev za toplotno obdelavo jeklenih izdelkov. Pri tem so upoštevani najnovejši izsledki pri preiskavah z modernimi metodami. Opisane oziroma našteje so tudi vse metode preizkušanja tekočih sredstev, predvsem kalilnih olj tako termične, metalurške, tehnološke in fizikalno-kemijske metode.

Uvod

Jeklene izdelke ohlajamo zelo različno, pač odvisno od tega, kaj hočemo pri tem doseči. Da bi jekleni izdelek kalili, ga iz kalilne temperature primerno hitro ohlajamo; ohlajamo ga s hitrostjo, ki je enaka ali večja od kritične ohlajevalne hitrosti. Ker pa je kritična ohlajevalna hitrost odvisna od sestave oz. legiranosti jekla, moramo za kaljenje imeti na razpolago ohlajevalna sredstva z različno ohlajevalno sposobnostjo. Pri tem moramo seveda upoštevati, da pri kaljenju jeklo ohlajamo tako hitro, kot je potrebno, torej ne z veliko večjo hitrostjo, kot je njegova kritična ohlajevalna hitrost.

Enakomerno kaljenje dosežemo le tedaj, ko sta izpolnjena naslednja dva pogoja¹:

1. točno držanje kalilne temperature in časa za popolno avstenitizacijo in

2. točno držanje temperature in ohlajevalne sposobnosti kalilnega sredstva.

Ta dva pogoja sta odločilna pri vsakem kaljenju. Prvem pogoju je možno ugoditi le s primerno dobro pečjo in regulacijskimi napravami. Težje je ugoditi drugemu pogoju. Ohlajevalna sposobnost se spremeni ob veliki obremenitvi tekočine, ko naraste temperatura tekočine, ali npr. z dodajanjem kalilnih soli v ohlajevalno kopel. Tu je potrebno še poudariti, da ni jasnih predstav o vplivu materiala in dimenzij kosa na ohlajevalno sposobnost sredstva.

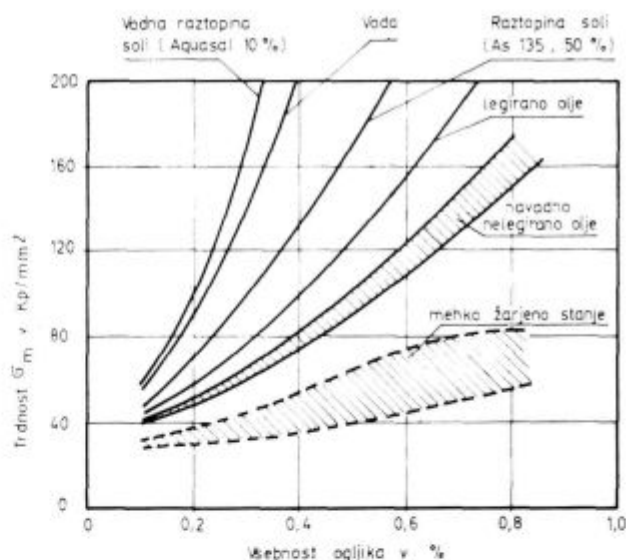
TEKOČA OHLAJEVALNA SREDSTVA

Kalilna sredstva delimo po njihovem vrelišču. Temperaturno območje vrelišča pa se lahko nahaja² npr.:

- nad kalilno temperaturo jekla (solne in kovinske kopeli)
- pod temperaturo okolja (zrak, dušik) ali
- kalilno sredstvo vre med samim kaljenjem (voda, kalilna olja).

Ohlajevalna sredstva lahko razvrstimo po njihovi ohlajevalni sposobnosti. Kvalitativno se tako lahko razporedijo **po doseženih mehanskih lastnostih**, npr. po raztržni trdnosti. Tako razvrstitev ohlajevalnih sredstev prikazuje slika 1. Vrednosti so dobljene takole:

valjasti vzorci jekla so kaljeni v posameznih sredstvih; nato je tem vzorcem določena raztržna trdnost. Vzorci so izdelani iz jekla z različno vsebnostjo ogljika.¹



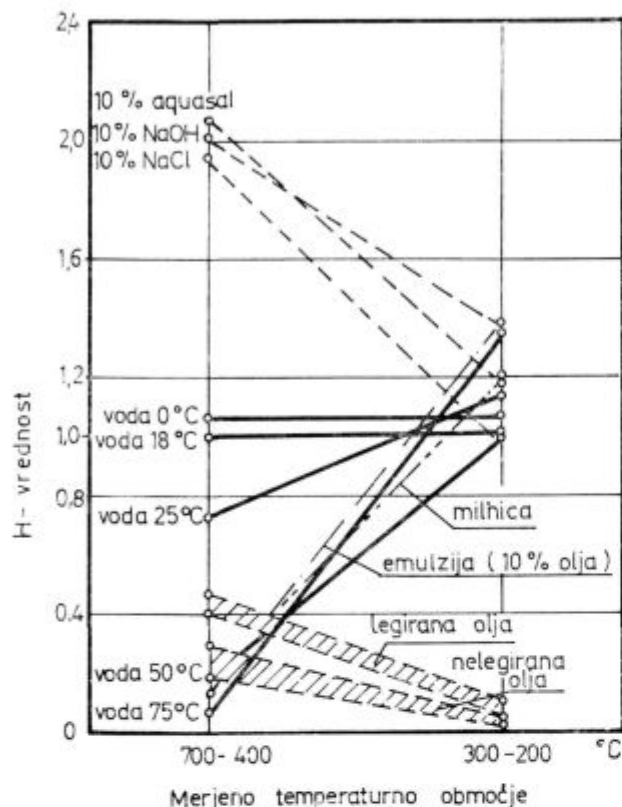
Slika 1:

Trdnost C-jekel, odvisna od ohlajevalnih sredstev

Ohlajevalna sredstva lahko razvrstimo tudi **z metodo srebrne krogle** (ki je opisana v poglavju Ohlajevalna sredstva), pri čemer iz ohlajevalnih krivulj za posamezna sredstva določimo ohlajevalno sposobnost v kritičnih območjih ohlajanja (npr. v perlitnem območju). Naslednja tabela prikazuje maksimalno ohlajevalno hitrost v °C/s za posamezna sredstva:

Tu je potrebno opozoriti na prednost, ki jo imajo olja, t. j., da je ohlajevalna intenzivnost H v temperaturnem območju tvorbe perlita relativno visoka in se zniža s padcem temperature. Za obe

Slika 3



Sl. 2 in 3:

H -vrednosti uporabnih ohlajevalnih sredstev

vrsti olj je v martenzitnem območju nižja od 0,1. Iz tega sledi, da je v območju tvorbe martenzita precej manjša intenzivnost ohlajanja in s tem tudi toplotne napetosti. S tem je tudi manjša nevarnost za deformacije in razpoke.

Če upoštevamo, da je faktor ohlajevalne intenzivnosti vode pri 18°C 1, potem so za ostala tekoča ohlajevalna sredstva te vrednosti predstavljene na naslednji sliki 3 za dve temperaturni območji.¹ Razlikujemo v bistvu tri skupine tekočih ohlajevalnih sredstev za kaljenje:

a) Skupina raztopin soli v vodi z vsebnostjo soli 10–15%. Ohlajevalna intenzivnost te skupine je v odločilnem območju temperatur 700 do 500°C zelo velika, 2 in več. Razpok je manj kot pri kaljenju v vodi, ker se parni plašč tvori, a ohlajevalna intenzivnost v območju tvorbe martenzita je manjša.

b) Ohlajevalna intenzivnost vode je v posameznih temperaturnih območjih nenavadna in celo neugodna. Ravno ta pregled H -vrednosti pojasnjuje,

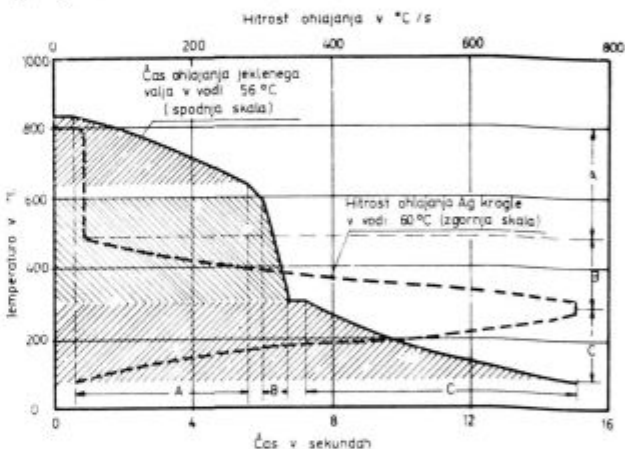
zakaj so mehka mesta, lisavost in razpoke posledica kaljenja v vodi. Čim višja je temperatura vode, tem manjša je H -vrednost v temperaturnem območju 700–400°C (precej pod 1), a v območju tvorbe martenzita je še vedno 1, t. j. višja. Pri višji temperaturi vode se tvori obstojnejši parni plašč. Ohlajevalna hitrost naraste prav v nevarnem območju, t. j. v območju tvorbe martenzita.

To je potrebno posebej poudariti pri emulziji vode z 10% olja in pri milnici, kjer je stanje še bolj neugodno. (Zato je zelo nevarna navada kalilcev, da si po končanem delu z milom umijejo roke v kalilni vodi. Taka voda je pravi strup za kaljenje.)

c) Tretjo skupino predstavljajo kalilna olja, kjer se med seboj jasno ločijo navadna nelegirana in legirana (ostra) olja.

Pojavi na površini jekla med kaljenjem

Ob potopitvi vročega kosa v tekoče ohlajevalno sredstvo se zvrstijo tri ločene faze druga za drugo, kot kaže ohlajevalna krivulja na sliki 4 za jedro jeklenega valja manjšega premera pri kaljenju v mirni vodi (56°C).¹



Sl. 4:

Primerjava krivulj: ohlajanja (jekleni valj) in ohlajevalnih hitrosti (Ag krogla)

V temperaturnem območju od 800 do 600°C leži faza A, t. j. faza tvorbe parnega plašča. Vroč kos je ovit s parnim plaščem in s tem izoliran. Zato je ohlajevalna hitrost tedaj relativno nizka. Ta pojav si lahko razlagamo tudi s plesanjem vodne kapljice na vroči plošči.

V temperaturnem območju med 600 in 300°C nastopa faza B, takoimenovana faza kuhanja, ko se razdre parni plašč in na jekleno površino doteka voda iz okolice. Ne nastaja več stabilni parni plašč, ampak na novo stvorjeni parni mehurčki sproti odhajajo od kosa; tekočina kuha. Za to fazo je značilno močno odvajanje toplote in to tem močnejše, čim večja je uparjalna toplota tekočine.

V tretji fazi C, v temperaturnem območju pod 300° C, je temperatura kosa padla že tako nizko, da se parni mehurčki ne morejo več tvoriti. Ohlajanje se nadaljuje le še z **odvajanjem toplote** in s konvekcijo. Hitrost ohlajanja je tedaj že razmeroma zelo nizka in neprekinjeno počasi pada.

Na tej sliki 4 je vnesena tudi krivulja ohlajevalnih hitrosti vode med celotnim ohlajanjem. Ta krivulja je narejena v Max-Planckovem inštitutu s srebrno kroglo. Ujemanje vse treh faz ohlajanja ni ravno točno, vendar je zadovoljivo.

Razvoj vseh teh treh faz ohlajanja je možno prav lepo zasledovati med kaljenjem v čistem olju (ali tudi vodi) v stekleni posodi⁴. Pri tem je možno jasno ločiti konec faze A, ko se lep, gladek in kompakten parni plašč nenadoma začne drobiti in se mehurčki razširjajo v okolico tekočine in tam zginevajo. Ko se na površini jekla prenehajo razvijati parni mehurčki oziroma ko jih v tekočini ni več, je konec faze B in tekočina samo še struji ob površini kosa. Končno je olje čedalje bolj mirno.

Če olje ni pretemno, se proces lahko filma s kamero večje hitrosti. Seveda je to možno izvesti tudi pri ohlajanju v vodi.

Idealno kalilno sredstvo naj ima veliko hitrost ohlajanja v fazi odvajanja parnega plašča in zmernejšo hitrost v končnem temperaturnem območju.⁵

Voda in vodne raztopine anorganskih soli imajo največjo ohlajevalno sposobnost. Ker se ta visoka ohlajevalna hitrost obdrži še do nizkih temperatur, se uporaba vodnega kaljenja omejuje na preproste kose in površinsko kaljenje jeklenih izdelkov.

Pri navadnem olju je parni plašč obstojen dalj časa kot pri vodi.

Ostra kalilna olja imajo večje ohlajevalne hitrosti, bližje vodi in večje kot navadna olja. Imajo pa manj stabilen parni plašč kot navadno olje.

Voda

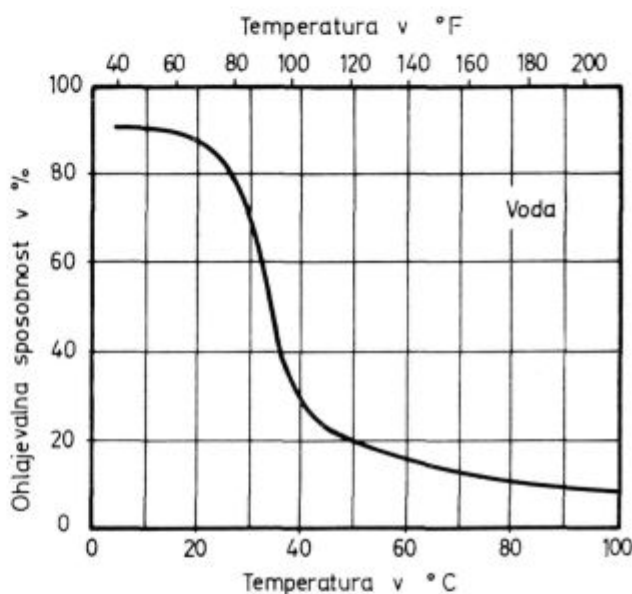
Kot kalilno sredstvo doseže navadna voda maksimalno ohlajevalno hitrost, ki je v tekočinah dosegljiva. Njena prednost je ta, da ni draga in je takoj uporabna, je lahko dostopna brez problemov okoli onesnaženja ali nevarnosti za zdravje. Voda je učinkovito sredstvo za luščenje škake z jeklenih izdelkov, ki se kalijo iz peči, v katerih se ne uporablja varovalna atmosfera.⁵

Ena od slabih strani navadne vode kot kalilnega sredstva je, da hitro ohlaja v majhnem temperaturnem območju, v katerem se rade pojavljajo deformacije in razpoke. Zato je uporaba vode vedno omejena na kaljenje enostavnih, simetričnih kosov iz plitvo kaljivega jekla (ogljikova in nizko legirana jekla). Druga slaba stran pri uporabi navadne vode je ta, da se faza A (tvorba parnega plašča) (slika 4) lahko precej podaljša. To podaljšanje je odvisno od stopnje komplicira-

nosti oblike kosa, ki ga kalimo, in od temperature vode za kaljenje. Povzroči neenakomerno trdoto in neugodno razporeditev napetosti, ki lahko povzroče deformacije in razpoke. V vodi kaljeni jekleni deli lahko zarjavijo, če jih takoj ne zaščitimo z zaščitnim sredstvom.

Da bi pri kaljenju v vodi lahko dobili rezultate, ki jih je možno ponoviti, moramo kontrolirati temperaturo, mešanje in onesnaženje.

Temperatura vode naj bo okoli 15 do 25° C. Tedaj je omogočeno dosegati enotne ohlajevalne sposobnosti in enakomerne rezultate. Kot se vidi na sliki 5, površinska ohlajevalna sposobnost vode strmo pade, ko naraste temperatura vode. Vroča voda ima nizko ohlajevalno sposobnost, ker se bližamo vrelišču in ohlajevalni učinek je podoben učinku vodne pare (glej sliko 3).



Sl. 5:

Približna ohlajevalna sposobnost vode pri zmernem mešanju, odvisno od njene temperature (ASM)

Mešanje je važno pri kaljenju v vodi, ker odstranjuje parne mehurčke od kosa in k njemu usmerja hladnejšo vodo. Meša se lahko z mehanskim vijakom, cirkulacijsko črpalko, s kontroliranim pretokom ali s kombinacijo teh metod.

Onečiščenje kalilne vode z raztopljenimi solmi ugodno poveča ohlajevalno sposobnost, ker soli močno zmanjšajo obstojnost parnega plašča. Nasprotno pa onesnaženje z raznimi mili, algami, blatom in emulzijami zmanjša ohlajevalno sposobnost z zadrževanjem parnega plašča, kar preprečuje dostop hladilni vodi do površine jekla.

Raztopljene soli, ki so nanesene iz aktivnih solnih kopeli v kalilni bazen, lahko motijo zaprti črpalni sistem ali zmanjšajo koristni volumen vode v kalilnem bazenu. Priporoča se periodično čiščenje ali zamenjava vode.

Slana voda

Kot kalilno sredstvo je slana voda vodna raztopina, ki vsebuje različne odstotke soli (natrijev klorid ali kalcijev klorid) skupno s posebnimi dodatki in antikorozijskimi inhibitorji.⁵ Seveda pa lahko taka kalilna voda vsebuje namesto soli druge anorganske spojine.

Slana voda ima pred navadno vodo in oljem naslednje prednosti:⁵

- ohlajevalna sposobnost je večja kot v vodi pri enakem mešanju,
- temperatura je manj kritična kot pri navadni vodi, zato ni potrebna tako ostra kontrola,
- zaradi manjše stabilnosti parnega plašča se manj pojavljajo mehka mesta in lisavost,
- deformacije so manj resne kot pri kaljenju v vodi,
- hlajenje slane vode ni tako nujno kot pri navadni vodi,
- medtem ko je pri bazenih s kalilnim oljem in vodo običajno potreben vijak za mešanje, pri slani vodi ni nujen.

Slabosti kaljenja v slani vodi običajno ne preprečijo njene uporabe, ker je kaljenje v slani vodi uporabno samo tam, kjer kaljenje v olju ali navadni vodi ne daje želenih rezultatov. Nekatere od slabosti so:⁵

- Korozijska narava slane vode zahteva, da so kalilni bazen, črpalka, prenosni mehanizmi in ostale naprave, ki so v stalnem dotiku s slano vodo, zaščiteni pred korozijsko ali izdelani iz korozijsko obstojnih kovin (bakrene zlitine ali nerjavno jeklo).
- Potrebne so posebne naprave za odvajanje korozijskih par, ki nastajajo nad slano vodo, da bi zaščitili sosednje stroje in precizne naprave.
- Stroški za slano vodo so višji kot za navadno vodo, posebno za dodatke in korozijske inhibitorje.
- Stroški narastejo tudi z laboratorijsko kontrolo raztopin.
- Večja je nevarnost pred zastrupitvijo in požarom, posebno če se uporabijo kaustične mešanice.

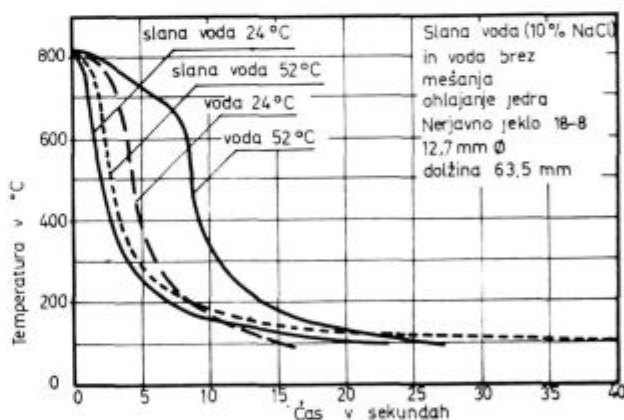
Ohlajevalna sposobnost slane vode je zelo odvisna od koncentracija anorganske spojine v vodi.

Jeklena valjasta proba ($\varnothing$ 12,7 mm, dolžina 50,8 mm) se v raztopini s 5 % (utežnih) NaOH pri 200 °C od 870 do 200 °C ohladi v 0,31 sekunde. Pri istih pogojih se v raztopini s 5 % NaCl ohladi v 0,48 sekunde, v navadni vodi pa v 1,2 sekunde. NaCl je cenejši, delo z njim je varnejše in lažje kot z NaOH, zato se mu daje prednost. Raztopina CaCl_2 (s 5–20 % ut.) doseže podobno ohlajevalno sposobnost kot NaCl. V naslednji tabeli so podane hitrosti ohlajanja od 875 do 727 °C za nekatere vodne raztopine soli, če je temperatura raztopine 20 °C; uporabljen je jeklen vzorec z 0,95 % C, dimenzijami $\varnothing$ 12,7 mm in dolžino 50,8 mm.⁵

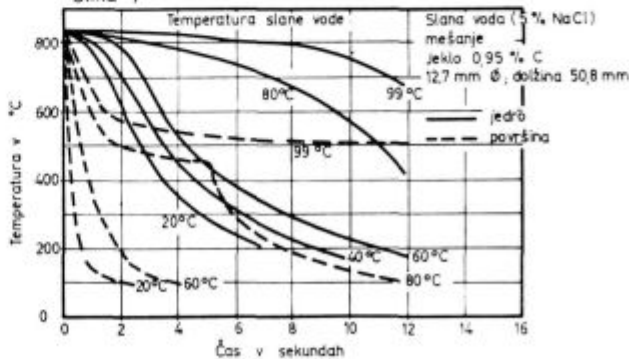
Kemikalija	Utežni %	Ohlajanje jedra v °C/sekundo
Voda		100 do 120
NaOH	2,5	197
NaOH	5,0	202
NaOH	11,5	202
NaOH	16,5	207
NaCl	5,0	171
NaCl	10,0	197
CaCl_2	5,0	171
CaCl_2	10,0	193
CaCl_2	20,0	171
NaCO_3	10,0	171
HCl	5,0	152
HCl	12,5	152
HCl	20,0	97
HCl	36,0	pod 51
H_2SO_4	5 do 20	143 do 152
H_2SO_4	30,0	93
H_2SO_4	95,0	77

Ugotovljeno je, da je pri kaljenju od vseh slanih vod najučinkovitejša raztopina z 9 % (ut.) NaCl, vendar se v nekaterih kalilnicah uporablja

Slika 6



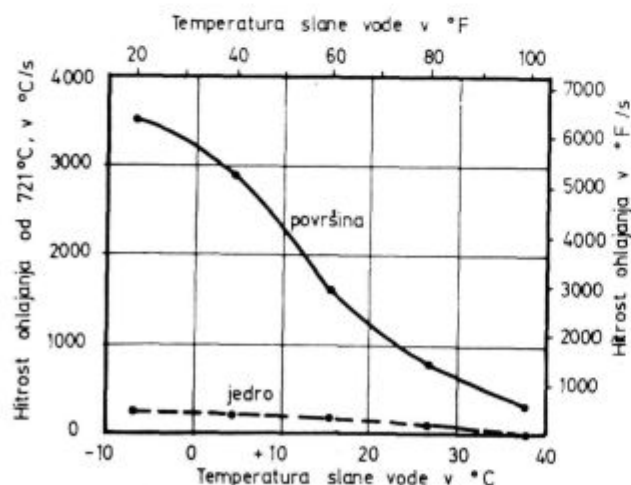
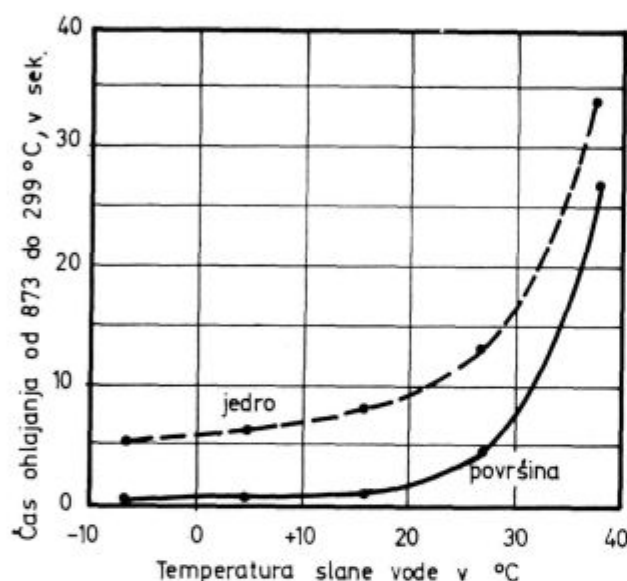
Slika 7



Sl. 6 in 7:
Ohlajevalne krivulje za slano vodo in vodo

tudi raztopina z manj kot 4% NaCl. Koncentracije nad 10% NaCl se redko uporabljajo, ker večje koncentracije NaCl znižajo stopnjo ohlajanja in povzročajo mehka mesta in razpoke.

Majhne spremembe delovne temperature ne vplivajo kritično na ohlajevalno sposobnost vodnih raztopin soli. Čeprav so take raztopine uporabne tudi pri temperaturah blizu vrelišča vode, je ugotovljena maksimalna ohlajevalna sposobnost pri temperaturi okoli 20°C. Ohlajevalne krivulje jedra, ki so prikazane na naslednji sliki 6, prikazujejo vpliv povišane temperature na ohlajevalno sposobnost vode v primerjavi s slano vodo (10% NaCl).⁵ Slika 7 pa prikazuje vpliv temperature raztopine na potek ohlajevalnih krivulj za jedro in površino za ohlajanje v slani vodi s 5% NaCl. Ohlajevalna sposobnost znatno pojema, ko se temperatura raztopine približuje vrelišču vode.



Sl. 8:

Vpliv temperature na kaljenje v slani vodi (5% NaCl)
Jeklo z 0,95% C 12,7 mm $\varnothing$ dolžina 50,8 mm, mešanje

Naslednja slika 8 prikazuje še enkrat vpliv temperature slane vode (5% NaCl) na njeno ohlajevalno sposobnost na površini in v jedru vzorca s premerom 12,7 mm in dolžino 50,8 mm, iz jekla z 0,95% C in na čas, ki je potreben za ohlajanje od 873 do 299°C.

Slano vodo moramo tudi vzdrževati, tako koncentracijo soli z redno kemijsko analizo in obnavljanjem kot tudi čistočo. Za kaljenje jeklenih kosov iz cianidnih kopeli se slane vode ne uporabljajo, ker obstaja nevarnost škropljenja zaradi eksplozije. Prenašanje kloridnih snovi je manj škodljivo za raztopino NaCl kot za kaustično raztopino.

Poleg vode in slanih vod se kot kalilne tekočine uporabljajo še **raztopine polivinilnega alkohola v vodi**. Uporablja pa se tedaj, ko kaljenje zahteva večjo ohlajevalno sposobnost kot najostreje olje, toda manjšo kot voda ali slana voda.⁵ Temperatura, posebno pa koncentracija te raztopine, močno vpliva na ohlajevalne karakteristike.

Kalilna olja

Kalilna olja lahko razdelimo v dva osnovna tipa: navadno olje in ostro legirano olje. Tretji tip pa je emulzija (voda — olje), ki je pa ne moremo razvrstiti po enakem sistemu. Posebnost so vroča olja za popuščanje.

Navadno kalilno olje je produkt frakcionirane destilacije surove nafte in nima nobenih dodatkov (aditivov). Ostro olje pa je manj viskozno in vsebuje dodatke, ki omogočajo, da olje ostreje kali.⁵

Kalilna olja imajo v prvi fazi kaljenja stabilnejši parni plašč in relativno nizko hitrost ohlajanja v končni fazi kaljenja. Parni plašč se lahko razbije šele z močnim mešanjem, čeprav je učinek mešanja olja sorazmerno majhen. Z raznimi dodatki se zmanjša trdnost parnega plašča.⁶

Olje ima v fazi kuhanja oziroma vrenja razmeroma visoko **ohlajevalno hitrost**, vendar dva do trikrat manjšo⁶ od tiste, ki jo dobimo s kaljenjem v vodi. V končni fazi ohlajanja ima olje zelo nizko ohlajanja itle faktorji: specifična toplota, prevod-hitrost ohlajanja.⁶ V tej fazi regulirajo hitrostnost in temperatura. Specifična toplota olj je polovico manjša od vode, a prevodnost je približno četrtnina one, ki jo ima voda. Hitrost ohlajanja v tej fazi je v vodi desetkrat večja kot v olju. V tej fazi ima mešanje odločilen vpliv, veliko močnejši kot viskoznost (glej sliko 2).

Vpliv lastnosti različnih kalilnih olj na karakteristike ohlajanja ni popolnoma poznan, vendarle je gotovo naslednje. Vrelišča večine olj so tako visoka, da majhne spremembe temperature olja malo vplivajo na trdnost parnega plašča. To je nasprotno pri pogojih kaljenja v vodi, ki ima nižje vrelišče kot olje. Pogoji kaljenja v vodi so tembolj občutljivi, čim manjša je razlika med vreliščem in temperaturo vode za kaljenje. V drugi fazi se jeklo celo hitreje ohlaja, če je olje toplejše, ker nižja viskoznost omogoči hitrejšo odvajanje pare

od jeklene površine. Vroče olje ima zelo nizko hitrost ohlajanja v tretji fazi, kar ugodno vpliva na zmanjšanje napetosti.⁶

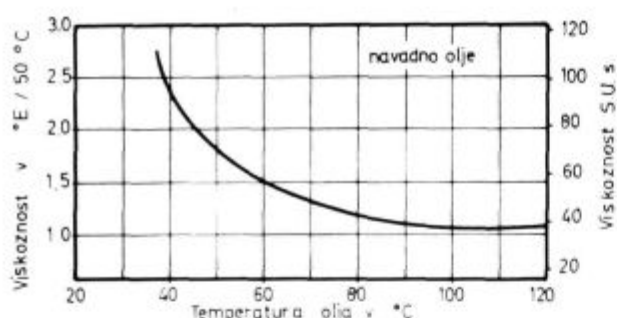
Ohlajevalna sposobnost narašča z naraščanjem gostote in naraščanjem vrelišča.

Ne glede na to, ali je olje navadno ali ostro, bi moralo biti obstojno proti razkroju, oksidaciji in ne bi smelo tvoriti usedlin. Olja se morajo izbirati po minimalni vrednosti vnetišča. Olja s prenizkim vnetiščem ne pridejo v poštev. Kolikor se temperatura olja vzdržuje dovolj nizko, vnetišče ni najvažnejše.⁵

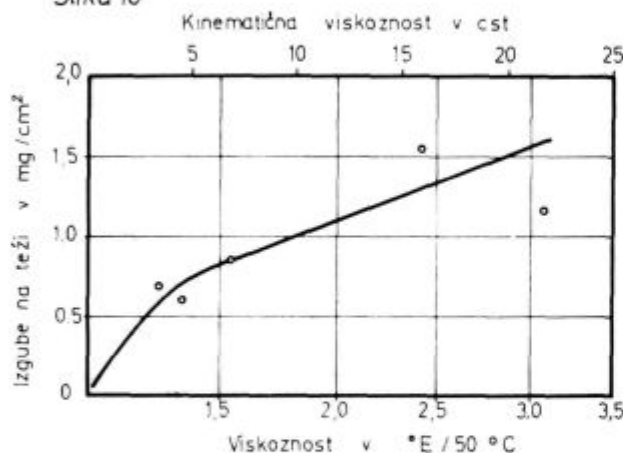
Ne glede na viskoznost se vsako olje do neke mere uparja, ko se vanj potopi vroče jeklo. Olje se vneme, dokler se jeklo popolnoma ne potopi, a uparjeno olje se kondenzira ob hladnem olju. Kalilno olje se ne vneme, če temperatura površine ne doseže gorišča.⁵

Viskoznost vpliva na ohlajevalne karakteristike. S povečanjem temperature se viskoznost rapidno zniža. To prikazuje slika 9. Čim manjša je viskoznost kalilnega olja, tem manjše so izgube olja z iznašanjem kaljenih izdelkov. Zato je važno

Slika 9



Slika 10



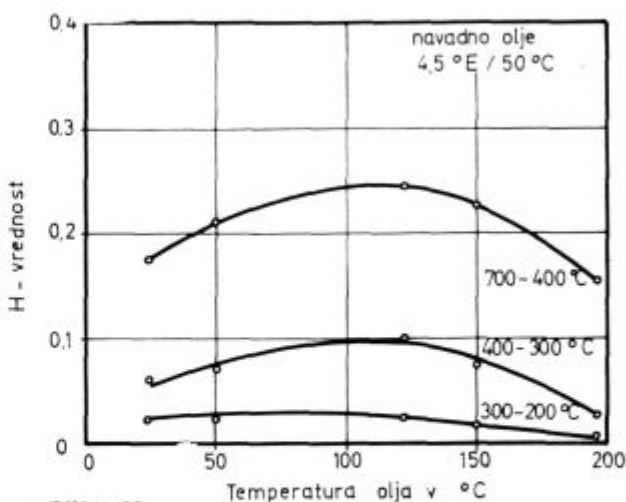
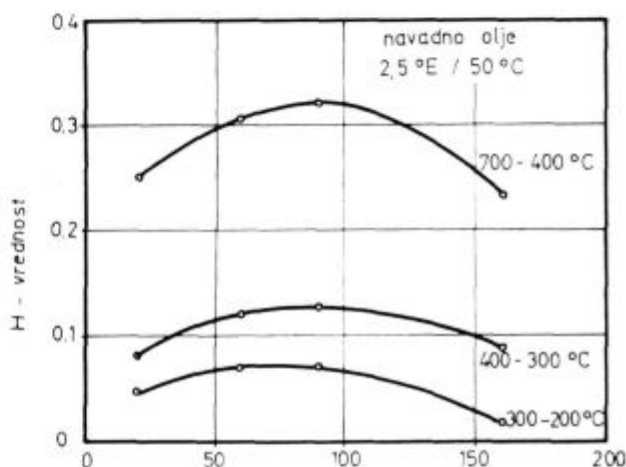
Sl. 9 in 10:

Vpliv temperature na viskoznost in vpliv viskoznosti na izgube olja

vzdrževanje primerne viskoznosti.⁵ Iz bazena se s kosi iznese 3 do 8 kg olja na eno tono kaljenih ksoov. Seveda je to odvisno od temperature olja in velikosti kosov. Naslednja slika 10 prikazuje te izgube.² Ostra olja imajo v splošnem nižjo viskoznost kot navadna olja.⁵

Optimalna temperatura je odvisna od naslednjih faktorjev: vnetišče olja, zahteve čistosti, kontrola razkrajanja in obremenitev ter zahteve kaljenja. Maksimalna obratovalna temperatura se ravna po vnetišču olja. Za varno obratovanje kopeli se mora temperatura kopeli vzdrževati najmanj 650 °C pod vnetiščem olja. Z nizko obratovalno temperaturo pa preprečujemo oksidacijo in razkroj olja in omogočimo čisto kaljenje. Kaljenje kosov z veliko površino v razmerju s prostornino zahteva zaradi velike obremenitve olja precej nižjo obratovalno temperaturo.

Slika 11

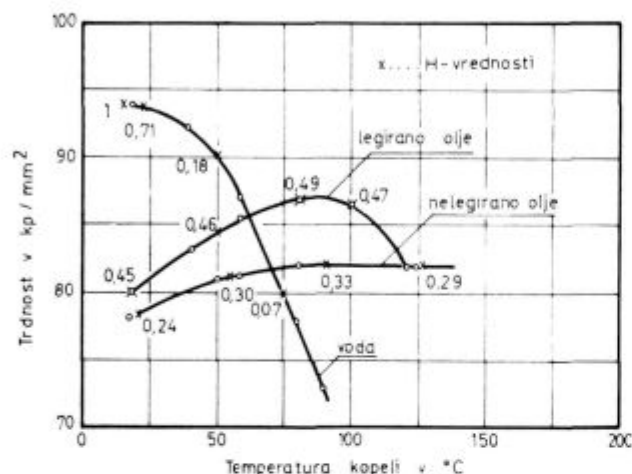


Slika 12

Sl. 11 in 12:

H-vrednosti kalilnih olj v odvisnosti od merjenega temperaturnega območja in temperature olja

Naslednja slika 11 prikazuje krivuljo faktorja ohlajevalne intenzivnosti v odvisnosti od temperature olja oz. optimalno temperaturo obratovanja olja z 2,5° E pri 50° C. Isto prikazuje tudi slika 12 za olje s 4,5° C pri 50° C.¹ Z višjo temperaturo se res zniža viskoznost, vendar se s tem tudi poveča nagnjenost k tvorbi parnih mehurčkov. Slika 13 prikazuje dosežene trdnosti jedra Č. 1530 (C-45) v odvisnosti od temperature za vodo, legirano olje in navadno olje. Ugotovljeno je, da se optimalne temperature, dobljene z ugotavljanjem faktorja H, ujemajo z onimi, ki so ugotovljene z določanjem trdnosti jedra.¹



Sl. 13:

Trdnost jedra okroglih palic Č 1530 (C 45) v odvisnosti od odgovarjajočih H-vrednosti ohlajevalnega sredstva

Onesnaženje olja je navadno združeno z razkrojem, ta pa je posledica oksidacije ali neprimerne pečne atmosfere. Razkrajanje olja se kmalu opazi, ker se na kaljene kose useda blato (produkti razkroja). To usedanje je neprijetno, ker je blato težko odstraniti, a odloženo blato poslabša odvajanje toplote.⁵ Z določevanjem vnetišča lahko odkrijemo obseg razkrajanja.

Za **selekcijo kalilnih olj** se v splošnem uporabljajo naslednji testi:⁶ specifična teža, viskoznost, vnetišče, gorišče, koksni test, energija emulgiranja in število umiljenja. Specifična teža je povezana s specifično toploto, toplotno prevodnostjo, uparilno toploto; vsi faktorji skupaj pa določajo hitrost ohlajanja v zadnjih fazah.

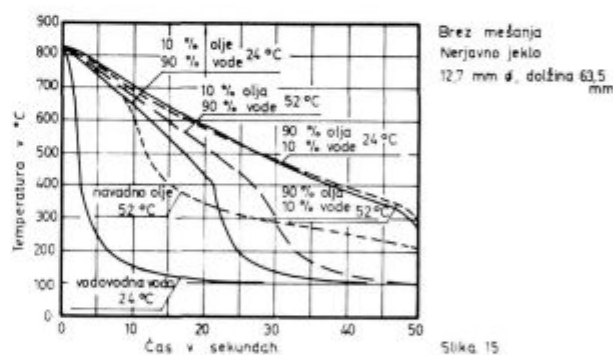
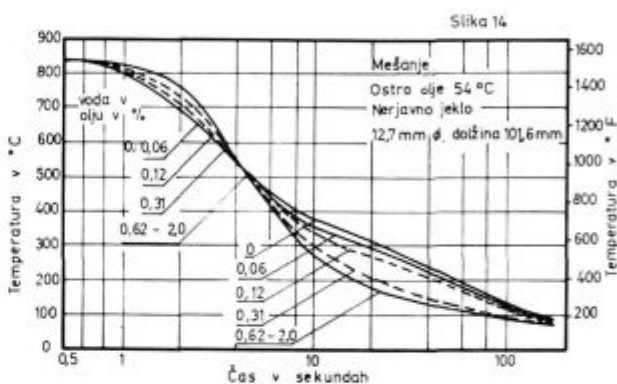
Zaželen je čimmanjši koksni ostanek, da bi bilo olje čimbolj stabilno. Število umiljenja pa je odvisno od tipa olja.

Dodatek mastnih olj (kot je repično) mineralnemu olju neznatno poveča ohlajevalno sposobnost, močno zmanjša stabilnost parne faze. Čisto repično olje ima večjo ohlajevalno sposobnost kot skoraj vsako mineralno olje, posebno pri nizkih temperaturah. To pomeni, da so možne kalilne razpoke.

Tu je potrebno poudariti, da se za kaljenje kov, ki so ogrevani v solni kopeli, sme uporabiti le čisto mineralno olje. Alkalijske solne kopeli povzročijo saponifikacijo olja in s tem hitro poslabšanje.

Voda v kalilnem olju

Sliki 14 in 15 prikazujeta vpliv vode, ki se nahaja v olju, na potek ohlajanja. Krivulje so posnete z vzorcem premera 12,7 mm dolžine 101,6 oz. 63,5 mm iz nerjavečega jekla, brez mešanja in z njim. Pri vsebnosti vode pod 0,15 % se pospeši ohlajanje v začetni fazi tvorbe parnega plašča, pri vsebnosti okoli 0,15 % vode pa je parni plašč že obstojnejši. Pri višjih vsebnostih vode se intenziviranje ohla-



Sl. 14 in 15:

Vpliv vode v olju na ohlajanje

janja pomakne k nižjim temperaturam. Voda v olju popolnoma spremeni pogoje kaljenja v olju. Olje se peni tedaj, ko je v olju prisotna voda. Temperatura, pri kateri se prične olje peniti, je odvisna od fizikalnega stanja vode v olju, od temperature olja, od vrste olja. Večja količina vode v določenih delih oljnega bazena lahko povzroči eksplozijo zaradi nenadne tvorbe večjega volumna pare. Z močnejšo cirkulacijo takega olja se zmanjša nevarnost eksplozije.

Voda pride v olje lahko na več načinov:² vdre iz vodnega hladilnika ali pa se kondenzira na pokrovu bazena in teče v olje.

Vodo lahko odstranimo iz olja na več načinov:⁵
 — dvignemo temperaturo olja do vrelišča vode (105—110° C),
 — pustimo, da se umiri in jo na dnu spustimo iz bazena,

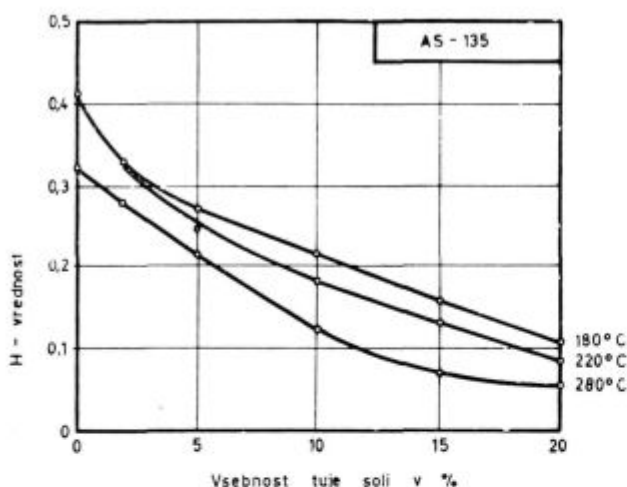
- olje centrifugiramo,
- olje filtriramo.

Filtrirana legirana olja se mora nato prekontrolirati na vsebnost dodatkov.

Prisotnost vode v emulzijah (olje—voda) zelo različno vpliva na ohlajevalne karakteristike. Kot je vidno na sliki 15, predstavljajo emulzije vode in olja najslabšo obliko vodnih in oljnih kalilnih sredstev. Emulzije z 10 % olja in 90 % vode zmanjšajo ohlajevalno intenzivnost pri višjih temperaturah (v primerjavi z navadnim oljem) v prvi fazi. Ohlajanje v naslednji fazi je v bistvu enako kot v vodi. V emulzijah z 90 % topljivega olja in z 10 % vode je ohlajevalna sposobnost slabša po celem ciklusu (v primerjavi z navadnim oljem).

Tople kopeli

Houghtonova Mainhardtova naprava, ki je opisana v poglavju Intenzivnost ohlajanja, je pravzaprav konstruirana za določanje ohlajevalne intenzivnosti (H - vrednost) toplih solnih kopeli. Slika 16 jasno kaže vpliv tujih soli v soli AS 135 oziroma onesnaženje kopeli z donešeno kalilno in cementacijsko soljo (prenašanje s kaljenimi deli) na zmanjšanje ohlajevalne intenzivnosti. Onesnaženje povzroči močan padec H - vrednosti.¹



Sl. 16:

H - vrednosti za toplo kopel AS 135 v odvisnosti od vsebnosti tuje soli in temperature kopeli

Izbor kalilnih olj

Izbor olja za kaljenje naj sloni na izkušnjah in obsežnih sistematičnih raziskavah. Če izkušnje niso uporabne, se mora uporabiti eno ali več metod za preizkušanje. Najvažnejši kriterij za izbor kalilne-

ga olja je zagotovitev ohlajanja in kaljenja brez razpok. Ostale ocene so velikost deformacij, cena končnega izdelka in dosežena mikrostruktura, posebno v cementiranih jeklih.⁵

Če ima jeklo zadostno kaljivost, bo popolnoma kalilo v navadnem olju, tedaj ne bo potrebno uporabiti dražjega ostrejšega olja. Če pa ima jeklo tako nizko kaljivost, da ne moremo niti v vodi doseči zadovoljivih rezultatov, potem tudi z ostrim oljem ne bomo rešili problema. Med tema ekstremoma pa lahko veliko problemov ugodno rešimo z uporabo ostrega olja. Upoštevati pa moramo, da ostro legirano olje povzroča pri kaljenju več deformacij kot navadno olje.

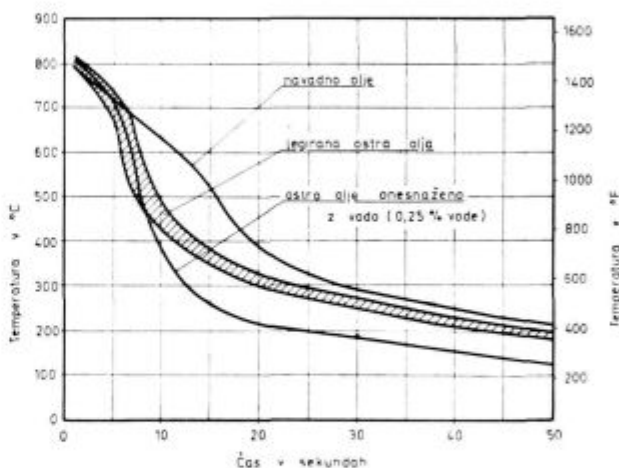
Primeren izbor kalilnih olj lahko precej poceni proizvodnjo:⁵

- z zmanjšanjem števila vrst jekel, ki so v uporabi,
- z zmanjšanjem izmečka oziroma potrebne poprave izdelkov in
- z zmanjšanjem obsega čiščenja po kaljenju.

Čeprav je bolj v navadi izbirati olje k jeklu, ki ga termično obdelujemo, je včasih nujno tudi obratno. Če imamo samo en bazen z ostrim oljem, potem zahteva to olje uporabo novega jekla s slabšo kaljivostjo. S tem so zmanjšane deformacije in stroški.

Na izbor olja vpliva tudi obratovalna temperatura, ki se vzdržuje iz kakršnega koli vzroka.

Ko izbiramo olje za kaljenje, si zelo lahko pomagamo z ohlajevalnimi krivuljami olj. Na teh krivuljah se vidi hitrost ohlajanja v posameznih temperaturnih območjih. Primer takih ohlajevalnih krivulj kaže slika 17, kjer so krivulje osmih ostrih olj (šrafirani pas), navadnega mineralnega olja in olja s približno 0,25 % vode. Te krivulje so dobljene z vzorcem avstenitnega nerjavnega jekla premera 12,7 mm, dolžine 63,5 mm, kaljenim v teh tekočinah s temperaturo 520° C.⁵



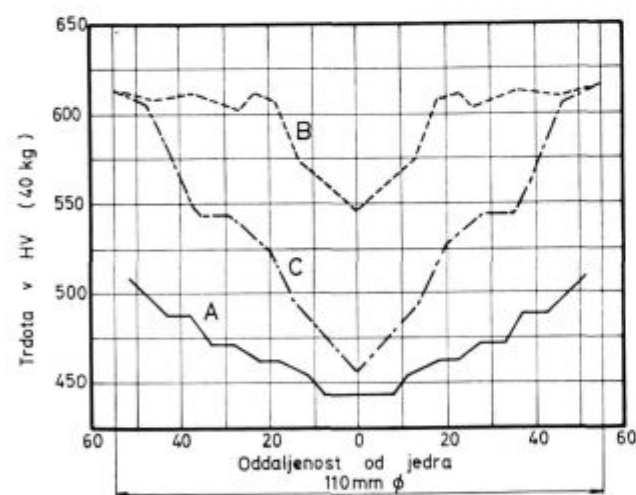
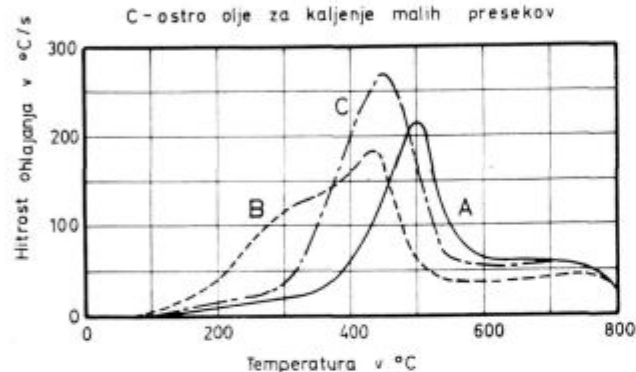
Sl. 17:

Ohlajevalne krivulje jedra avstenitnega nerjavnega jekla v navadnem legiranem in z vodo onesnaženem olju

Hladilna sposobnost pa je odvisna od oksidne kože, cirkulacije in temperature. Naslednja tabela podaja primerjavo magnetnega preizkusa (opisan v poglavju Magnetska metoda 6 ostrih in 2 navadnih olj za ozorje, ogrevane v oksidacijski in redukcijski atmosferi.⁵

Vzorec olja	Čas ohlajanja v sekundah od 913° do 354° C za vzorce ogrevane v:	
	oksidacijski atmosferi	redukcijski atmosferi
Ostro olje	9,8 14,4	15,0 . . . 20,4
Navadno olje	17,8 19,6	29,9 . . . 31,0

A - navadno mineralno olje 4,5° E/50° C
B - ostro olje za kaljenje velikih presekov
C - ostro olje za kaljenje malih presekov



Sl. 18:

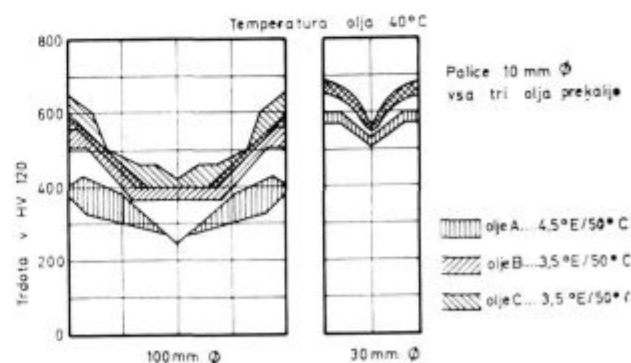
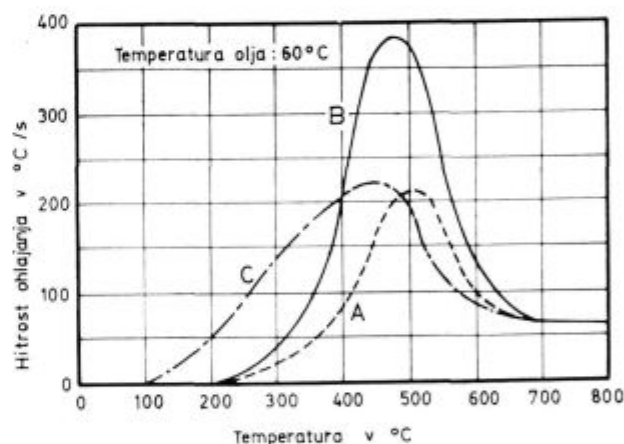
Krivulje ohlajevalnih hitrosti (Ag-krogla ϕ 20 mm) kalilnih olj in dosežene trdote na jekleni palici ϕ 110 mm

Pri izbiri olj pa si še bolj pomagamo s **krivuljami ohlajevalnih hitrosti**, ki jih posnamemo s **srebrno kroglo**. Za tri kalilna olja podaja take krivulje slika 18, ki so dobljene s srebrno kroglo premera 20 mm. A — navadno mineralno olje z viskoznostjo 4,5° E/50° C, B — ostro olje za kaljenje

velikih presekov in C — ostro olje za kaljenje drobnih presekov. Kcs premera 110 mm najgloblje kali olje B, najmanj pa olje A. Drobnim kosom da večjo trdoto tudi olje C.⁷

Seveda pa si lahko pomagamo z določanjem **trdote po preseku kaljenega kosa**. Na te rezultate vpliva tudi sestava taline. Slika 19 prikazuje ohlajevalne vrednosti za tri olja, posnete s srebrno kroglo in rezultate prečnih trdot za dve debelini jeklenih vzorcev (ϕ 100 in ϕ 30 mm) za ta tri olja. Olje A je mineralno olje z viskoznostjo 4,5° E/50° C za svetlo kaljenje. Olji B in C sta legirani olji z viskoznostjo 3,5° E/50° C, ki imata določene dodatke. Ti dodatki vplivajo zelo različno, kot je videti na sliki. Olje B ima maksimalno ohlajevalno hitrost v temperaturnem območju 400—500° C (v fazi kuhanja). Olje C je uporabno za debelejšše kose, ker odvaja tudi pri nižjih temperaturah še dokaj hitro vso toploto, ki prihaja iz sredine kosa in s tem doseže večjo trdoto v jedru, t.j. večjo prekaljivost.² Olje B je uporabnejše za kaljenje drobnih kosov.

Kje naj leži **maksimalna ohlajevalna hitrost** na ohlajevalni krivulji srebrne krogle? Pri kaljenju hočemo vse dele kosa ohlajati z nadkritično ohlajevalno hitrostjo, tudi jedro. Za zelo tanke kose naj bo maksimum nekaj nad 650° C. Za debele kose



Sl. 19:

Krivulje ohlajevalnih hitrosti (Ag-krogla) kalilnih olj in dosežene trdote na jeklenih palicah (jeklo C 4830 — 50 CrV4) ϕ 100, 30 in 10 mm

pa naj leži čim nižje, in to tem nižje, čim večji je presek. Pri velikih presekih visokoležeči maksimum povzroči večje toplotne napetosti in s tem prekomerne deformacije. Če hočemo kaliti ne samo za dosego enakomerne trdote, temveč tudi brez deformacij, ne sme ohlajevalni maksimum nastopiti prej, kot je za najgloblje plasti jekla to potrebno in ne sme trajati dlje kot toliko, da so vse plasti pretvorjene v martenzit.⁷

Tudi naslednja slika 20 nam lahko ilustrira izbor olja. Temperatura olja naj bo 60 do 100°C. Zelo tanke liste in trakove se kali v olju s temperaturo do 120°C. Za kose, ki so zelo nagnjeni k deformacijam, je boljša uporaba toplega olja (150 do 200°C) kot solne kopeli.²

Študij krivulje ohlajevalnih hitrosti za olja, ki jo dobimo s srebrno kroglo, nam daje še naslednje zaključke o vplivih posameznih faktorjev na rezultate kaljenja in o vplivu faktorjev med seboj.

Spremembo faktorja ... dosežemo Rezultat spremembe

Pomik maksimuma k nižjim temperaturam (v levo)	z višjo temperaturo, manjšo viskoznostjo	višja trdota, večja prekaljivost
--	--	----------------------------------

Pomik maksimuma k višjim temperaturam (v desno)	z nižjo temperaturo, večjo viskoznostjo	nižja trdota, manjša prekaljivost
---	---	-----------------------------------

Dvig maksimuma (povečanje ohlajevalne hitrosti)		višja trdota, manjša prekaljivost, večji vpliv temperature olja na trdoto
---	--	---

Širša krivulja (širši maksimum)		večja prekaljivost, manjši padec trdote pri višji temperaturi olja
---------------------------------	--	--

Višja temperatura olja		maksimum se pomakne v levo, zmanjša se viskoznost, ojača stabilnost parnega plašča, zmanjša ohlajevalna sposobnost
------------------------	--	--

Manjša viskoznost		maksimum se pomakne v levo
-------------------	--	----------------------------

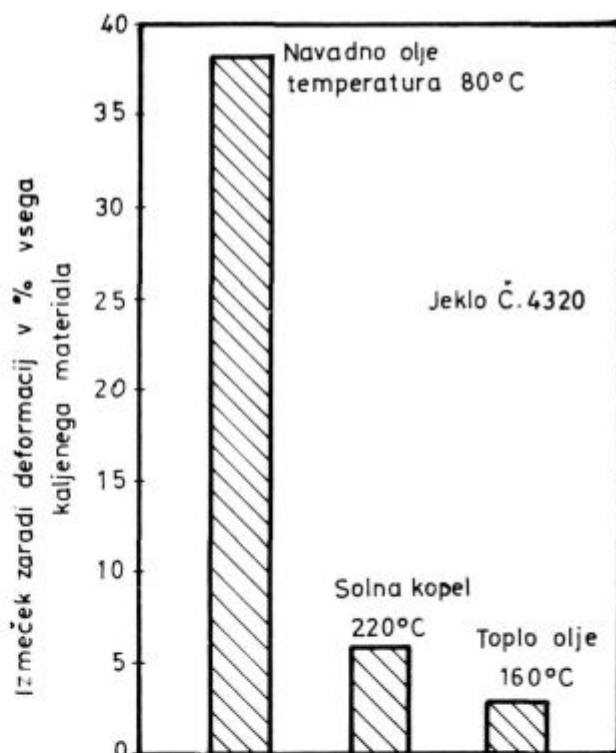
Pri uporabi se lastnosti olja spreminjajo. Olja zgubljajo kalilno sposobnost, posebno navadna nelegirana olja. Pri normalnih pogojih se sme olje

uporabljati 5 do 10 let. Sveže olje ima še veliko lahko hlapljivih ogljikovodikov in drugih sestavin, ki jih izgubi že v prvem tednu uporabe. Na življenjsko dobo močno vpliva onesnaženje s škajo in vodo, zato se mora olje sproti čistiti.²

Naslednja slika 21 nam prikazuje primerjavo krivulj ohlajevalnih hitrosti (srebrna krogla) za sveže in rabljeno olje: A — navadno olje z viskoznostjo 4,5° E/50°C, B — ostro olje z viskoznostjo 1,6° E/50°C. Krivulje jasno kažejo, da se navadna olja veliko bolj spreminjajo kot legirana ostro olja.⁷

PREIZKUSANJE IN OCENA TEKOČIH OHLAJEVALNIH SREDSTEV

Za preizkušanje in oceno različnih kalilnih sredstev je več načinov. Veliko se uporablja termična metoda direktnega določanja ohlajevalne krivulje. Iz te se grafično dobi krivuljo ohlajevalnih hitrosti. Znale so tudi intervalne metode, fizikalni metodi z vročo žico in magnetska metoda, metalurška metoda kaljivosti, vizualna metoda, Grossmannova metoda ohlajevalne intenzivnosti in laboratorijske fizikalno-kemijske metode.



Sl. 20: Deformacije pri kaljenju plinsko naogliččenih zobatih koles (C 4320—16 Mn Cr 5) v različnih kopelih

Ohlajevalna krivulja

Ohlajevalna krivulja je najbolj točna ocena ohlajevalne sposobnosti, s katero se ugotavlja kompletni kalilni proces. Ohlajevalna krivulja prikazuje prenos toplote pri kaljenju kot tudi točko rekalescence v kaljivih jeklih.

A - navadno kalilno olje 4,5 °E/50°C

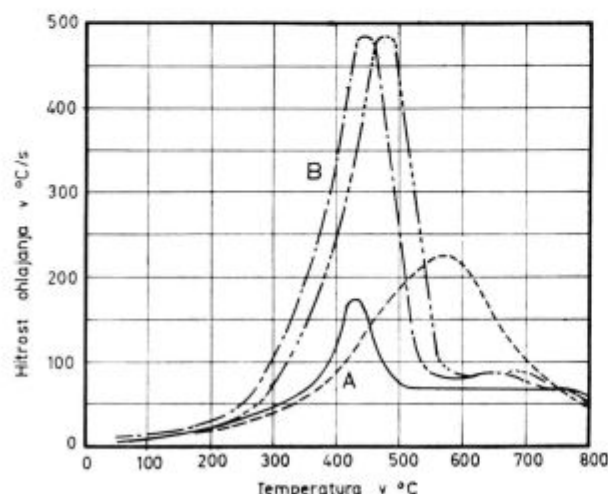
— novo nerabljeno

--- 6 let rabljeno, vsebnost asfalta 2%, kalilna sposobnost močno zmanjšana

B - ostrejšje in stabilnejše olje, 1,6 °E/50°C

— novo nerabljeno

--- 7 let rabljeno, vsebnost asfalta 0,5 %, kalilna sposobnost komaj zmanjšana



Sl. 21:

Sprememba ohlajevalne sposobnosti olja pri uporabi

Za posnemanje ohlajevalne krivulje se lahko uporabi način s **srebrno kroglo** po Engelu^{11, 13} kroglo iz avstenitnega jekla, ki tudi nima premene in škajanja ali način s cilindričnim vzorcem. Namesto srebra se lahko uporabi avstenitno nerjavno jeklo, nikelj ali pa tudi ogljično jeklo. Krogla ima lahko premere 10, 20, 50... mm. Termopar se namesti ali v sredino ali čim bližje k površini ali oboje. Zaradi slabše toplotne prevodnosti mora biti namestitev termopara v jeklih bolj precizna kot v vzorcih iz srebra. Tudi instrument mora hitreje reagirati pri srebru kot pri jeklu. Na površini nameščeni termopar mora biti sposoben odkriti posebnosti ohlajevalne krivulje, ki jih ne občuti v centru nameščeni termopar.⁵

Na sliki 22 je shematsko prikazana naprava za določanje ohlajevalne krivulje z avstenitno kroglo. Nad bazenčkom s preizkuševanim oljem je nameščena električno ogrevana pečica, v kateri se ogreva krogla. V središču krogle je nameščen termopar (npr. Fe — konstantan) in zaščiten v nosilni cevi (tudi avstenitna). Krogla se v peči ogreje na predpisano temperaturo (800°C) in spusti v olje. Temperaturo se neprekinjeno meri z elektronskim pisarjem. Olje je lahko mirno ali ga mešamo. Ča-

sovni pomik traku naj bo med preiskavo v intervalih 0,1 sek., posebno če je termopar nameščen na površini krogle.⁸

S pomočjo Ott-derivimetra se grafično dobi **krivuljo ohlajevalnih hitrosti**, ki omogočajo najjasnejši vpogled v lastnost olja.⁸ Iz krivulje lahko odčitavamo ohlajevalne hitrosti za vsako temperaturo posebej in v vsaki fazi kaljenja.

Izkustveno lahko **izračunamo hitrost ohlajanja** jeklenega kosa pri 720°C po naslednji enačbi:⁹

$$V = \frac{0,4 \cdot S}{W} \cdot n \cdot C_2$$

V hitrost ohlajanja v 100°C/s

S površina kosa v cm²

W prostornina kosa v cm³

n in C₂ ... konstante, ki so odvisne od ohlajevalnega sredstva.

Ohlajevalno sredstvo	Oblika kosa	n	C ₂
5 % NaOH Okrogle epruvete, palice		1,84	3,86
Voda	Krogla	1,75	3,89
	Okrogle epruvete, palice	1,75	3,91
	Plošče	1,75	4,03
povprečno			3,94
Olje	Krogla	1,40	3,22
	Okrogle epruvete, palice	1,40	3,03
povprečno			3,12
Mirni zrak	Okrogle epruvete, palice	1,15	0,31

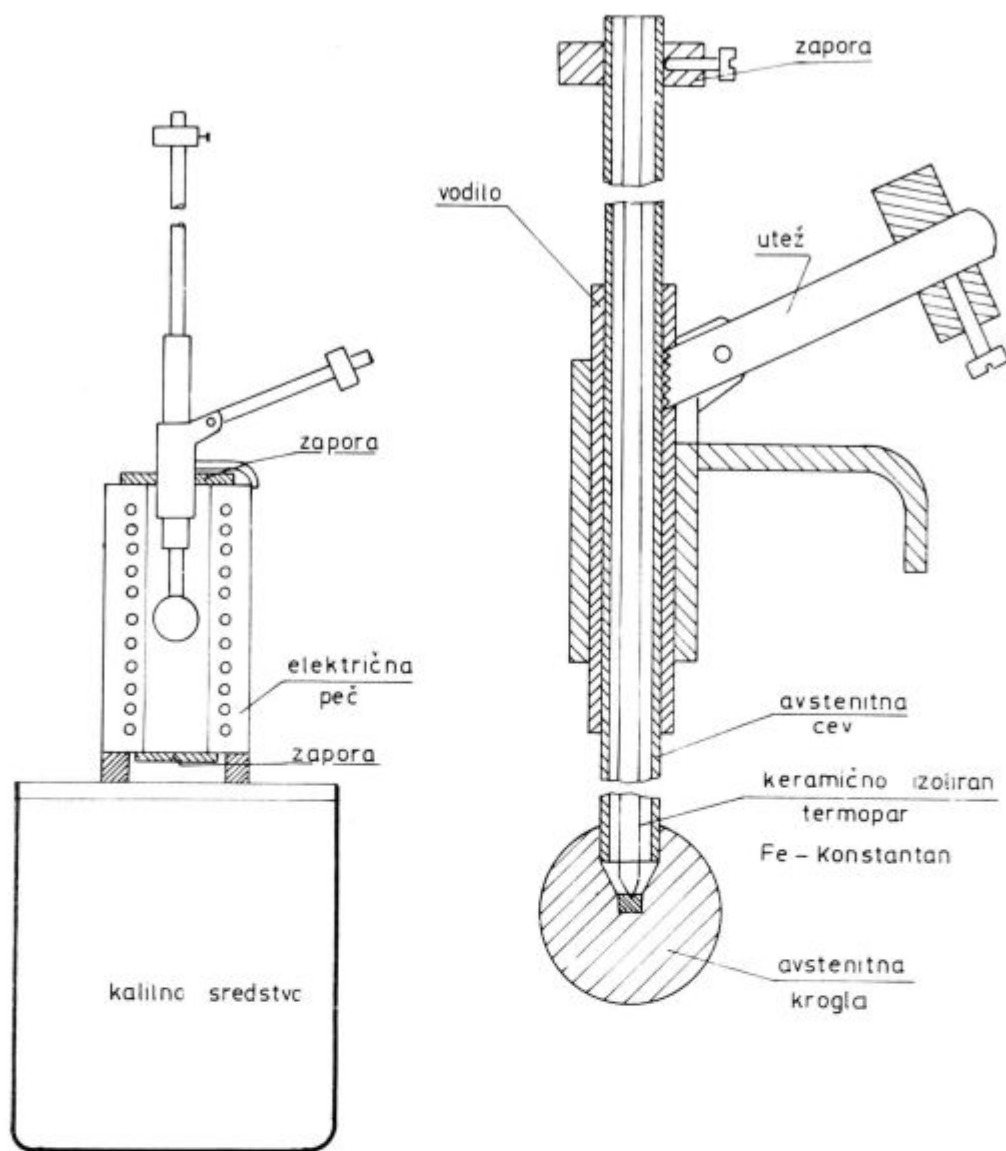
Metoda intervala

Intervalna metoda »prvih pet sekund« je hitra metoda za primerjanje ohlajevalnih sposobnosti kalilnih sredstev. Pri tej metodi postavimo dvolitrski vzorec olja v kalorimeter in beležimo temperaturo. Kovinski valjasti vzorec Ø 25 mm, dolžine 66 mm, običajno iz nerjavnega jekla, se ogreje na 815°C in ohlaja v olju točno 5 sekund. Nato se oljni vzorec dobro premeša, da se izenači temperaturo se ponovi za serijo vzorcev. Enak vzorec se ohlaja v olju do najnižje temperature (okolja). Ohlajevalno sposobnost olja se nato izračuna:

A

B

. 100 % in dobimo v odstotkih izraženo sposobnost odvajanja toplote v 5 sekundah v primerjavi s celotno toploto. Pri tej formuli pomeni A — povprečni narastek temperature pri petsekundnem ohlajanju vzorca, B — pa maksimalni narastek temperature oljnega vzorca pri popolnem kaljenju.⁵



Sl. 22:
Shema naprave za posnemanje ohlajevalnih krivulj

Namesto petsekundnega merjenja lahko uporabljamo osemsekundno merjenje. Dopusna so seveda tudi merjenja v drugih intervalih.⁴

Naprava je sestavljena iz vertikalne cilindrične električne peči, pod njo je v kalorimetru kalilno olje z mešalcem. Kalorimeter je opremljen z napravo za ogrevanje in ohlajanje, za merjenje in regulacijo temperature; tako se lahko kalilni pogoji spreminjajo po želji. Vzorec, običajno iz nerjavnega jekla, ima v sredini termopar. Ko doseže v peči predpisano temperaturo, se vzorec avtomatično spusti v olje. Pri tem se meri čas in registrira temperatura.

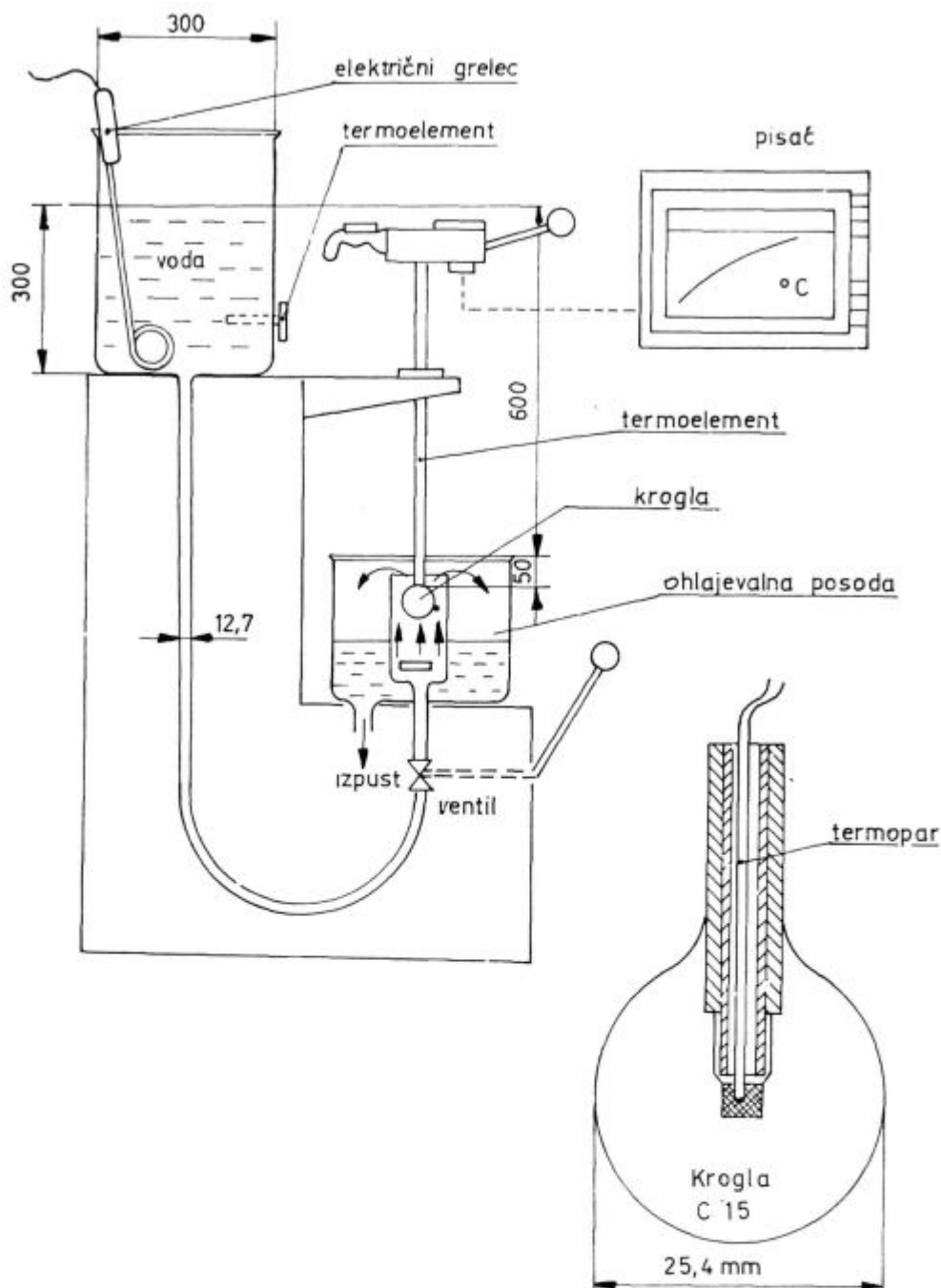
Ta metoda je široko uporabna za določanje velikih sprememb pri kalilnem olju, ker je hitra in ne potrebuje posebne opreme.

Tako lahko ocenimo delež odvedene toplote v posameznih fazah, izraženo z odstotki maksimal-

nega narastka temperature, če opazujemo naraščanje temperature v različnih intervalih. Čim večji je odstotek v prvi fazi, tem večjo ohlajevalno sposobnost ima in tem boljše je olje. To je eden od natančnih načinov za ločitev med kalilnimi olji in daje dragocen podatek o lastnostih olja v različnih fazah kaljenja. Ta metoda razporedi olja v isto vrsto kot ohlajevalne krivulje.⁴ Ker zajema samo višje temperaturno območje kaljenja, pa nas pri primerjavi olj lahko zavede.

Metoda O. Dorigo¹⁴

Ta metoda je kombinacija med opisano intervalno metodo in Grossmannovo metodo določanja H-vrednosti (opisana v poglavju Intenzivnost ohlajanja). S to metodo dobimo praktično enoto ohlajevalne sposobnosti.



Sl. 23:

Shema naprave za določevanje ohlajevalne vrednosti °D

Slika 23 prikazuje shemo celotne naprave za ohlajanje v vodi in konstrukcijo krogle, ki ima v tem primeru premer 50,8 mm (oziroma 2 coli) in je narejena iz jekla C 15. V centru krogle je montiran termopar.

Kroglo ogrejemo v posebni peči z varovalno atmosfero ali v solni kopeli na temperaturo 800° C in jo potopimo v gibajočo se vodo vsaj 50 mm globoko, pri čemer takoj vključimo štoparico (1/100 sek.). Čas merimo do trenutka, ko pade temperatura v centru krogle na 250° C. Z večkratno pono-

vitvijo dobimo dovolj točen povprečni osnovni čas, ki znaša za vodovodno vodo 0,44 minut. Ohlajevalno sposobnost za vodo dobimo:

$$^{\circ}D = \frac{K}{T} = \frac{44}{0,44} = 100$$

pri čemer je:

$K = 0,44 \cdot 100 = 44$ minut ... osnovni primerjalni čas,

$T = 0,44$ minut ... izmerjeni čas.

Za ostala sredstva dobimo ohlajevalno sposobnost z različnim mešanjem, če opisano prenosno epruveto (kroglo) ogrejemo zopet v varovalni atmosferi ali solni kopeli na 800° C in jo potopimo vsaj 100 mm globoko v merjeno sredstvo. Pri tem zopet merimo s štoparico čas, da pade temperatura od 800 na 250° C. Iz osnovnega časa K in tega izmerjenega časa T (npr. za merjeno sredstvo smo namerili čas (T = 2,03 minute) izračunamo ohlajevalno sposobnost.

$$^{\circ}D = \frac{K}{T} = \frac{44}{2,03} = 21,7$$

Poleg omenjenega intervala 800—250° C lahko uporabimo kakšen drug interval, npr. 800—550° C ali podobno.

Ta metoda ni znanstvena, temveč praktična in jo lahko dobro uporabimo v obratu kakor tudi pri kontroli kupljenih sredstev.

Metoda z vročo žico

Metoda z vročo

Ta metoda sestoji iz ogrevanja žice NiCr z električnim tokom v malem vzorcu olja (200 ml). Olje se navadno preizkuša pri sobni temperaturi; žica je pritrjena na dve bakreni elektrodi. Ogrevanje žice se uravnava z reostatom, tako da tok enosmerno narašča. Ohlajevalno sposobnost olja se označuje s kvadriranjem odčitka maksimalnega toka, merjenega na ampermetru, ko se olje vžge. Olja, ki so sposobna odvajati toploto hitreje, dovoljujejo skozi žico večji tok in tako se registrira večja vrednost toka. Ohlajanje pa se izvrši precej nad normalnim območjem ogrevanja za jekla in ne kaže velike razlike med ostrimi olji. Ta test je podoben testu »prvih pet sekund« v tem, da samo primerja olja v visokem temperaturnem območju kaljenja.

Magnetska metoda

To metodo opravimo z ogretjem pribl. 50 g težke nikljeve kroglice premera 22,2 mm (7/8") na 885° C (1625° F) na zraku ali v varovalni atmosferi (lahko se uporabi difuzijsko kromirana nikljeva krogla, da se izognemo nujnosti uporabe varovalne atmosfere; a označiti se mora spremenjeno površino). Ko je temperatura izenačena, se kroglo kali v vzorcu olja 200 ml, ki se nahaja v magnetnem polju. Potreben je tolikšen čas, da se krogla ohladi od 885° C do Curiejeve temperature za nikelj (354,4° C); pretečeni čas, da pritegne magnet, se označi kot mera za ohlajevalno moč olja. Curiejeva temperatura niklja je pod nosom izotermalnih transformacijskih diagramov za večino jekel. Tako se lahko s to metodo primerja kalilna olja. Čim ostrejšje je olje, tem krajši je čas, da nikelj reagira na magnetizem.

Modificirana magnetna metoda se uporabi za študij vpliva cirkulacije in ogrevanja na hladilno moč kalilnih olj.

Naprava, poznana kot elektronski »kalilometer« (quencher), je montirana neposredno v kalilni sistem, tako da so rezultati dobljeni v normalnih okoliščinah.

Metalurška metoda⁴

Bistvo metalurške metode ocenjevanja olja je modificirana metoda določanja kaljivosti. Medtem ko se kaljivost določa s kaljenjem različnih jekel v standardni tekočini, se ohlajevalno sposobnost določa s kaljenjem standardnega jekla v različnih preizkuševalnih tekočinah. Na različnih cilindričnih vzorcih se po kaljenju meri trdota na prečnem prerezu. Trdote se nanese v diagram v odvisnosti od oddaljenosti od sredine. Po globini in doseženi trdoti se oceni kaljivost.

To metodo se lahko modificira tako, da se namesto valja uporabi stožec, ki združuje vpliv različnih premerov v enem vzorcu. Po kaljenju se stožec prereže in določi trdota na vzdolžnem prerezu. Stožec ima lahko različne dimenzije, npr. dolžina 130 mm, premer pada od 25 mm do 3 mm, jeklo z 0,45 % C, kaljeno 845° C. Vzdolžno prerezano ploskev je možno tudi mokro jedkati. Že po načinu jedkanja je možno oceniti kalilno sposobnost tekočine.

Za ocenjevanje olja so boljše metode, pri katerih se vzorec (epruveto) pri kaljenju popolnoma potopi, od metod, kjer se epruveto kali s konca oziroma s čela. Od teh zadnjih je Jominyev preizkus najbolj poznan. Ta preizkus je teoretično tudi uporaben za primerjavo ohlajevalnih sposobnosti tekočin, praktično pa ni dovolj selektiven. Curek tekočine, ki ohlaja čelo epruvete, razbije parni plašč tako hitro, da ni možno opaziti razlike med olji.

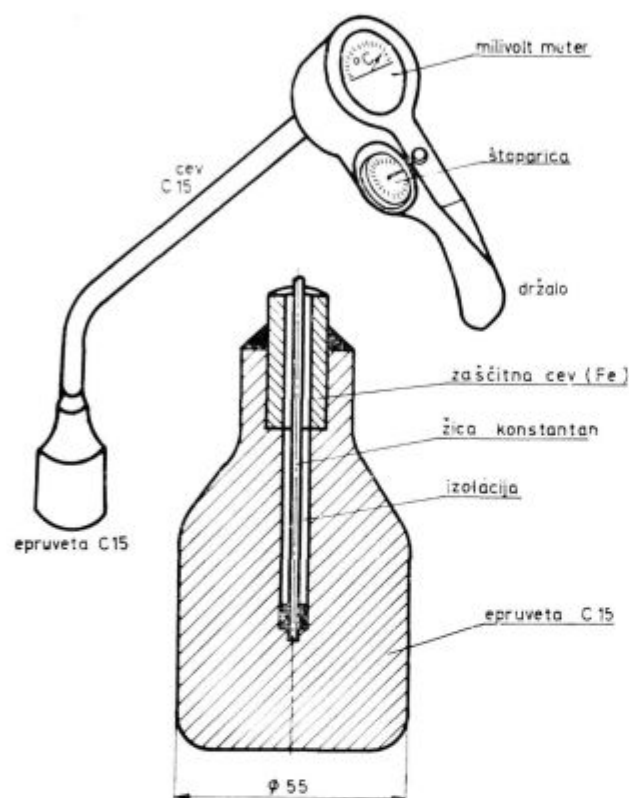
Ohlajevalne tekočine lahko ocenjujemo tudi z zasledovanjem deformacij kalilne **srpaste epruvete**.⁵ V svetu je znanih več, bolj ali manj podobnih epruvet z različnimi dimenzijami. Epruveto se naredi iz standardnega kaljivega jekla. Ogreva se jo v peči z varovalno atmosfero in ohlaja v sredstvu, ki ga preizkušamo. Po kaljenju se meri sprememba dimenzij.

Poseben način ocenjevanja kalilnega olja je **vizualno spremljanje kalilnega procesa**. Na ta način se lahko ocenjujejo samo svetlejšje tekočine. Vzorec olja damo v stekleno posodo. Ko potopimo v olje segreto epruveto, opazujemo potek kaljenja. Možno je opaziti konec faze tvorbe parnega plašča, konec druge faze, ko mehurčki izginejo in potek ohlajanja med tretjo fazo, ko je olje mirno. Če olje ni pretemno, se proces lahko filma s kamero večje hitrosti (glej tudi poglavje Pojavi na površini jekla med kaljenjem).

Intenzivnost ohlajanja

Sposobnost ohlajevalnega sredstva odvajati toploto od vročega kosa se izraža s terminom »faktor ohlajevalne intenzivnosti H«. Za določitev tega

faktorja se meri hitrost ohlajanja v $^{\circ}\text{C/s}$ v temperaturnem območju tvorbe perlita (približno med 721 in 500°C oziroma 400°C). Primeren aparat za to merjenje je Meinhardtov aparat (Houghton), ki ga kaže slika 24 (quencher) in ga lahko uporabljamo za nekatere druge metode. Sestavljen je iz telesa (epruvete) iz jekla C 15, ki je s cevjo in termoelementom povezano z merilno glavo, ki ima instrument za merjenje temperature in štoparico. Termopar (Fe - konstantan) je nameščen v centru epruvete.



Sl. 24:

»Houghton« — merilec ohlajevalne sposobnosti

Epruveto se ogreje v solni kopeli na temperaturo 750°C in hladi v preiskovanem sredstvu. Pri tem se meri čas ohlajanja (sekund) v temperaturnem območju 700 in 400°C . Izračuna se povprečna ohlajevalna hitrost za to območje. Intenzivnost ohlajanja v vodi pri 18°C se pri istih pogojih in z isto napravo določi 30°C/s . Razmerje med temi ohlajevalnimi hitrostmi nam da Grossmannovo H - vrednost. Seveda se lahko meri čas ohlajanja tudi za vsakih 100°C ali za temperaturno območje $700-300^{\circ}\text{C}$ in $700-200^{\circ}\text{C}$ poleg že omenjenega območja $700-400^{\circ}\text{C}$. Pri merjenju ohlajevalnih hitrosti vode se mora upoštevati njeno trdoto oziroma sestavo.¹

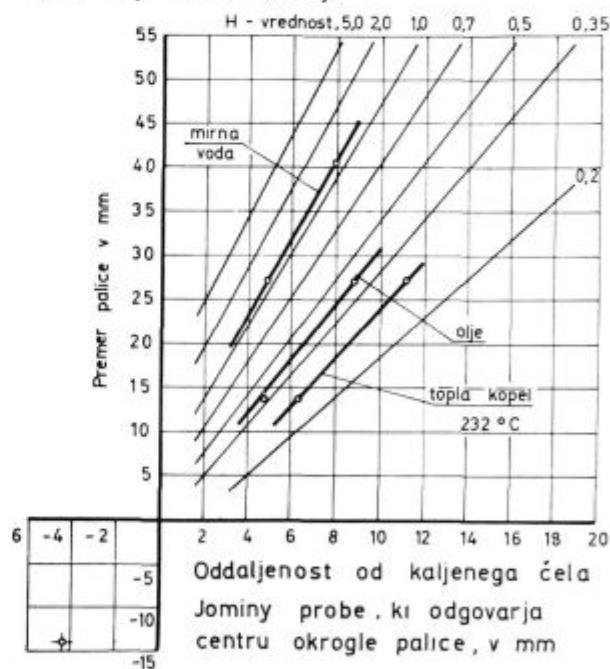
Če je H - vrednost mirne vode 1, potem so H - vrednosti olja, vode in slane vode za posamezne intenzivnosti mešanja podane v naslednji tabeli.⁵

Mešanje	olje	Voda	Slana voda
brez mešanja	0,25 do 0,30	0,9 do 1,0	2,0
blago mešanje	0,30 do 0,35	1,0 do 1,1	2,0 do 2,2
zmerno mešanje	0,35 do 0,40	1,2 do 1,3	—
srednje mešanje	0,40 do 0,5	1,4 do 1,5	—
močno mešanje	0,5 do 0,8	1,5 do 2,0	—
zelo močno mešanje	0,8 do 1,1	2,0 do 6,0	5,0 do 8,0

Odnos med premerom jeklene palice, kaljivostjo in H - vrednostjo je prikazan na sliki 25. Imenuje se tudi diagram po M. A. Grossmannu, ki je razvil koncept H - vrednosti in jo prilagodil kaljivosti jekla. Podrobnosti o tem so opisane v njegovi knjigi »Principi toplotne obdelave«.¹⁵ Diagram se uporablja takole:

H - vrednost (intenzivnost ohlajevanja).

- 5,00 - ostra slana voda - zelo močno mešanje
- 2,00 - slana voda - brez mešanja
- 1,00 - voda - brez mešanja
- 0,70 - ostro olje - zelo močno mešanje
- 0,50 - dobro olje - srednje mešanje
- 0,35 - dobro olje - zmerno mešanje
- 0,20 - olje - brez mešanja



Sl. 25:

Grossmannov diagram odvisnosti premera palice, kaljivosti jekla in H - vrednosti

Če hočemo jeklen kos s premerom 30 mm kaliti v olju s srednjim mešanjem, odčitamo za to debelino pri H - vrednosti $0,5$ na abscisi vrednost

9 mm. To pomeni, da bo sredina palice imela isto trdoto kot standardna Jominyeva proba iz istega jekla pri oddaljenosti 9 mm od kaljenega čela.

Podatki na diagramu so približni, ker obsega kaljenje opis glavnega termina (npr.: »dobro kaljenje v olju — srednje mešanje«). Dodatna težava pri tem je tudi točnost ocenjevanja načina oziroma intenzivnosti mešanja.

Warren F. Rushman je opisal enostavno metodo za ocenjevanje ohlajevalne intenzivnosti kalilne tekočine pri vseh pogojih obremenitve.¹⁶ Metoda bazira na uporabi diagrama na sliki 25. Če poznamo kaljivost jekla, t. j. Jominyevo krivuljo in trdoto v jedru palice poznane premera, je mogoče določiti ohlajevalno intenzivnost H. Na primer 9 mm od kaljenega čela oddaljena točka na Jominyevi probi ima trdoto 45 Rc. Palica iz istega jekla premera 30 mm, ima po kaljenju v tekočini v jedru trdoto 45 Rc. Na diagramu se odčita intenzivnost ohlajanja 0,5.

Ne da bi merili trdoto v jedru palice premera 25 mm, jo lahko določimo z uporabo diagrama na sliki 25. Na primer: trdota v jedru palice naj je 48 Rc, a Jominyeva krivulja za to jeklo ima 48 Rc v oddaljenosti 6 mm od kaljenega čela. Vodoravna in navpična črta za ti dve vrednosti (25 mm Ø in 6 mm) se sekata na črti ohlajevalne intenzivnosti 0,7. Tako smo določili, kako intenzivno se mora pri kaljenju ohlajati jeklena palica premera 2,5 mm, da bomo v jedru dosegli želeno trdoto 48 Rc.

Kot je prikazano na sliki 25 za kaljenje v olju, črte različnih ohlajevalnih intenzivnosti na Grossmannovem diagramu konvergirajo k točki izven diagrama. To točko sečišča se lahko uporabi kot drugo točko na katerikoli novi črti ohlajevalne intenzivnosti. Kot primer je na gornji sliki debeleje označena črta »olje«. Dve poizkusni točki na tej črti sta določeni s kaljenjem palice iz jekla znane kaljivosti pri dveh različnih premerih (27 in 13 mm). Z uporabo palice z dvema premeroma se nam nudi odličen način za kontrolo rezultatov, ker daje tri točke na črti. Rezultati treh različnih operacij kaljenja (v vodi, olju in topli kopeli), kar je določeno z dvema premeroma probe, so označeni na sliki. Osnovna prednost te metode je, da se probe lahko kalijo skupaj z ostalimi izdelki; tako kaljenje je ocenjeno pri pogojih temperature in mešanja, ki dejansko prevladuje v proizvodnem kaljenju kosov. Proba mora imeti tak premer, da s kaljenjem dosežena trdota v jedru probe leži na padajočem delu kalilne krivulje za preizkušano jeklo. Metodo se lahko ugodneje izvede z jeklom za površinsko kaljenje, ker ta tip jekla dopušča uporabo prob z majhnimi premeri, ki se lažje stružijo po kaljenju. Uporaba površinsko kaljivega jekla ne zmanjšuje rezultatov preizkušanja, ker je intenzivnost ohlajanja neodvisna karakteristika kopeli in ni odvisna od velikosti kosov ali kaljivosti.

Standardni fizikalno-kemijski preizkusi

K standardnim preizkusom prištevamo določitev **vnetišča** in **gorišča**.

Viskoznozt je absolutna dinamična in absolutna kinematična. V C. G. S. sistemu je enota za absolutno dinamično viskoznozt — poise (p.), a enota za absolutno kinematično viskoznozt je stoke in

$$\text{stoke} = \frac{p}{\text{gostota}}$$

Razen za zelo viskozne tekočine se uporablja stotine teh vrednosti, t. j. centipoise (cp.) in centistok (cs.). Absolutna kinematična viskoznozt se meri direktno z merjenjem časa pretoka standardne količine olja skozi stekleno kapilarno viskozimetra (poznani je Ubbelohdeov viskozimeter). Iz tako dobljene vrednosti po gornjem obrazcu izračunamo dinamično viskoznozt. Za večino primerov zadostuje kinematična viskoznozt. Posebni primeri viskozimetrov so pa: Redwoodov, Sayboltov (USA) in Englerjev (Evropa).

Poleg omenjenih podatkov viskoznozt imamo v novjšem času še **indeks viskoznozt**. Ta indeks je empirična vrednost, ki naznanja vpliv spremembe temperature na viskoznozt olja. Vrednosti, dobljene s posameznimi viskozimetri, lahko preračunamo v drugo enoto pri isti temperaturi, če pomeni:

V_k — kinematična viskoznozt (centistoke),

E — stopinje po Englerju,

R. I. — Redwood I. (sekunde),

S. U. — Saybolt Univerzal (sekunde).

Za viskoznozt nad 10 cs. se uporabljajo naslednji faktorji preračunavanja:

$$\begin{array}{ll} E = 0,132 V_k & V_k = 7,58 E \\ R. I. = 4,05 V_k & R. I. = 30,7 E \\ S. U. = 4,62 V_k & S. U. = 35,11 E \\ V_k = 0,247 R. I. & V_k = 0,216 S. U. \\ E = 0,0326 R. I. & E = 0,0285 S. U. \\ S. U. = 1,14 R. I. & R. I. = 0,877 S. U. \end{array}$$

Pri oljih za popuščanje in izotermno kaljenje (martempering) se določa še najnižjo temperaturo, pri kateri olje še teče.

Starost olja se zasleduje z določanjem **nevtralizacijskega števila** oziroma kislosti, t. j. število miligramov KOH, ki je potrebno za nevtralizacijo enega grama olja. Rafinirana olja vsebujejo brezpomembno količino kislin. Poslabšanje olja je povezano s povečanjem kislosti.

Enako velja za **število umiljenja** (oz. saponifikacijsko število), ki določa pretvarjanje olja in masti v milo z alkalijami. Število umiljenja je število miligramov KOH, ki je potrebno za umiljenje enega grama olja.

Poleg tega se v oljih redno določa tudi **specifična teža** in barva.

Posebni tehnološki preizkusi⁴

Ceprav je zanimiva, vendar ni standardne metode za določevanje **hlapljivosti** kalilnih olj. Včasih se to določa pri kalilnih oljih n. pr. z ogrevanjem pri temperaturi 150 do 200° C 2 do 8 ur. Potem se meri izgube na teži. To določanje je zelo približno, ker so pogoji kaljenja različni.

S **sedimentacijskim preizkusom** rabljenih olj določimo dvojne snovi: oksidacijske produkte in neraztopljene tuje materije. Nekaj oksidacijskih produktov je lahko raztopljenih v olju, nekaj pa je izločenih. Tuje materije v rabljenem olju so: škaja, kalilne soli, rja itd.

Kako in zakaj se določa vsebnost **vode**, je že opisano v poglavju Voda v kalilnem olju.

Mnogo laboratorijskih metod je izdelanih za ugotavljanje, kako se olje obnaša v uporabi pri oksidacijskih pogojih. Tipični primer je britanski **oksidacijski test**, pri katerem se piha zrak skozi olje pri 200° C pri kontroliranih pogojih. Pred oksidacijo in po njej se odloča viskoznost in **preizkus koksanja** (Couradson in Ramsbottom).

Po potrebi se olju določa tudi prevodnost toplote in latentna toplota.

Preizkusi novega in rabljenega olja⁴

Moderna mineralna kalilna olja imajo dolgo uporabnost zaradi visoke notranje stabilnosti.

Težko pa je izumiti enostaven laboratorijski preizkus, ki bi dal resnično oceno o uporabnosti in obnašanju olja. Malo drugače je s popuščnimi olji in olji za izotermno kaljenje.

Pri **novem svežem olju** navadno zadostuje določiti vnetišče in viskoznost, vizualni pregled čistoče in bistrosti ter prisotnost tujih snovi. Če hočemo ugotoviti vsebnost mastnih snovi, se določi še število umiljenja. Popuščna olja in olja za izotermno kaljenje so navadno brez masti. Kalilna olja, v katerih se kali iz solnih kopeli, naj bodo brez mastnih snovi; nekaj jih smejo vsebovati ostale vrste olj.

Rabljenega olja ni potrebno redno kontrolirati. Če hočemo oceniti stanje olja, pa se navadno priporočajo naslednje določbe: viskoznost, vnetišče, sedimentacija in nevtralizacijsko število. V praksi je tendenca, da naraščajo vrednosti za vse te štiri lastnosti. Ob primerjanju teh vrednosti z vrednostmi za sveže olje ugotovimo, kako je napredovalo poslabšanje olja oziroma ugotovimo nenormalne pojave. Manj rafinirana olja se bolj spreminjajo. Zelo priporočljiva je kontrola vsebnosti vode v olju. Če je nad 0,5 %, smemo posumiti v kvaliteto olja in je zadosten vzrok za zamenjavo ali reklamacijo olja.

Zaključek

Proces kaljenja je sestavljen iz dveh glavnih operacij: ogrevanja na kalilno temperaturo in ohlajanja s primerno hitrostjo. Na rezultate kaljenja

torej močno vpliva vrsta in stanje ohlajevalnega sredstva. Če je ohlajevalno sredstvo tako važno, potem moramo posvetiti dovolj veliko skrb izbiri in vzdrževanju ohlajevalnega sredstva.

Vodovodna voda je res najcenejše kalilno sredstvo, tudi vzdrževati jo je lahko, vendar je zelo neugodno sredstvo. Ko vodi, v kateri kalimo, močno naraste temperatura, se maksimum ohlajevalne hitrosti pomakne iz območja tvorbe perlita in bainita v območje tvorbe martenzita. To se pri kalilnih oljih in slani vode ne dogaja. Zato se pri večjih zahtevah izogibajmo kaljenju v navadni vodi; enako neugodni pogoji kaljenja so v milnici in emulziji.

Kalilna olja so v zadnjem času že precej različna in prilagojena posameznim zahtevam. Zato je razumljivo, da je potrebno spoznati te lastnosti olj in izbirati primerna olja: za kaljenje kosov z velikim presekom izberemo olje, ki nima prevelike maksimalne ohlajevalne hitrosti in še to pomaknjeno v območje tvorbe bainita, za kaljenje drobnih kosov pa je maksimalna ohlajevalna hitrost lahko večja in pri višji temperaturi (v območju tvorbe perlita ali med območjem tvorbe perlita in območjem tvorbe bainita). Pri tem moramo upoštevati, da imajo posebne kemične dodatke. Upoštevati moramo tudi to, da so legirana mineralna olja veliko stabilnejša in se z dolgoletno rabo njihove ohlajevalne sposobnosti zelo malo spremenijo.

Pri izbiri kalilnega olja igra veliko vlogo vnetišče olja, posebno v takih obratih, ki nimajo možnosti sigurnega vzdrževanja dovolj nizke temperature olja, a je olje močno obremenjeno. V takem primeru tudi ni možno izbrati najprimernejše olje, ker imajo posebna olja velikokrat nižjo temperaturo vnetišča kot navadna olja.

Razvitih je precej metod preizkušanja kalilnih tekočin od strogo laboratorijskih do strogo obratnih, praktičnih. Posebno v zadnjih desetletjih se razvijajo eksaktnejše metode, katerih rezultati preizkušanja so čedalje bolj uporabni v praksi.

Najjasnejšo sliko o lastnosti kalilnega olja da vsekakor krivulja ohlajevalnih hitrosti, ki jo dobimo iz krivulje ohlajanja srebrne kroglice. Ta metoda zahteva precej laboratorijske opreme. Rezultati, dobljeni s to metodo, se težko prenesejo na praktične pogoje. Zato so morda najprimernejše razne metalurške metode in metoda določanja faktorja intenzivnosti ohlajanja H. S to metodo se tudi lahko loči tekočine med seboj in določa optimalno obratovalno temperaturo. Za določanje H-vrednosti se rabi zelo malo laboratorijske opreme.

Poleg teh preizkušanj pa se ne sme zanemariti preizkušanja fizikalno kemijskih lastnosti tekočin. Za kalilna olja je vsekakor potrebno redno zasledovati specifično težo, vnetišče in gorišče, viskoznost, število umiljenja, nevtralizacijsko število in vsebnost vode. Bazen z oljem pa se mora redno čistiti.

Literatura

- ¹ Rühenbeck A., Das Abkühlvermögen der Härteöle und ihre Einordnung in die Reihe der gebräuchlichen Abkühlmittel, Härterei — techn. Mitt., Bd. 10, H. 2.
- ² Kara W. H., Öle und Einrichtungen für die Ölhärtung von Stahl, Stahl u. Eisen 81 (1961) Nr. 21, str. 1416
- ³ Peter W., Über das Abkühlvermögen flüssiger Härtemittel, Archiv f. d. Eisenhüttenwesen 20 (1949) H. 7/8, str. 263/274.
- ⁴ Oils for Heat Treatment. Shell publikacija (fotokop.)
- ⁵ Quenching and Martempering, Ohio, ASM (cop. 1964) XIII + 277 str.
- ⁶ Roberts G. A., J. C. Hamaker, A. R. Johnson, Tool Steels, Ohio, ASM, (cop. 1962) XX + 780 str.
- ⁷ Burgdorf Karl W., Das Abc der Silberkugellkurve der Abschreckhärtemittel, Das Industrieblatt, Julij 1958.
- ⁸ Hauke E., S. Pakrasi, Festigkeitverhalten eines gehärteten Werkzeugstahles in Abhängigkeit von Anlasszustand, Härterei — techn. Mitt., 20 (1965) H. 1, str. 1/16.
- ⁹ Veličković Z., Prikaz metode Dr. O. Dorigo za praktično določanje H-vrednosti ohlajevalnih sredstev za kaljenje, Zbornik referatov »Savremena tehnologija termičke obrade metala«, Beograd 1966.
- ¹⁰ Schaaber O., R. Catterjee — Fischer, Härterei — techn. und Wärmebehandl., 14 (1959).
- ¹¹ Rose A., Arch. Eisenhüttenwes. 1939/40, str. 345/54
- ¹² Kopietz K. H., Härterei — techn. und Wärmebehandl. 1957, str. 37.
- ¹³ Engel E., Untersuchungen über die Stahlhärtung, Köbenhavn, Danmark Naturvidenskabelige Samfund 1931.
- ¹⁴ Dorigo O., Proposition d'une unite pratique pour le pouvoir refroidissant, Lausanne, Societe Suisse des Traitements thermiques 1965.
- ¹⁵ Grossmann M. A., E. C. Bain, Principles of Heat Treatment, 5. izd., Ohio, ASM 1964.
- ¹⁶ Warren F. Rushman, Metal Progress, dec. 1963.