

VPLIV MASE JEKLA IN VRSTE SREDSTEV ZA GAŠENJE NA MEHANSKE LASTNOSTI JEKLA

EFFECTS OF QUENCHING AGENT AND MASS OF STEEL ON THEIR MECHANICAL PROPERTIES

Janez Grum, Slavko Božič, Roman Lavrič

Fakulteta za strojništvo, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana, Slovenija

Prejem rokopisa – received: 1999-04-01; sprejem za objavo – accepted for publications: 1999-04-28

Mehanske lastnosti strojnega dela so odvisne od vrste izbranega jekla in od načina toplotne obdelave. V ta namen so bile razvite različne metode za ugotavljanje prekaljivosti jekel, kot sta Jominyjeva in Grossmann-ova metoda. Jominyjeve krivulje prekaljivosti so omogočile razvoj ustreznih meril za ocenjevanje prekaljivosti in primerjavo jekel. Lamont in Assimow sta izdelala posebne diagrame, ki omogočajo pri jeklih za poboljšanje predpisovanje ustrezne temperature za visoko popuščanje, ki zagotavljajo ustrezne mehanske lastnosti glede na maso strojnega dela in intenzivnost hladilnega medija. V prispevku so prikazani rezultati ohlajevalnih intenzivnosti nekaterih doma razvitih olj in polimernih vodnih raztopin. Izvedeni so bili tudi številni preizkusi merjenja temperature na vzorcih z različnimi masami jekla za poboljšanje, ki dajejo zelo pomembne informacije o hitrostih ohlajanja materiala pri uporabi različnih sredstev za gašenje. Dosežene hitrosti ohlajanja pa za dano jeklo s poznanim kontinuirnim diagramom ohlajanja omogočajo določevanje mikrostrukturnih sprememb in s tem tudi napovedovanje njegove mehanske lastnosti jekla.

Ključne besede: jekla za poboljšanje, sredstvo za gašenje, mikrotreda, hitrost ohlajanja, intenzivnost ohlajanja

Mechanical properties of a machine part depend on the kind of steel used and heat treatment applied. To this end various methods of determination of through-hardenability of steels, such as Jominy and Grossmann methods, have been developed. The Jominy hardenability curves have made it possible to set up appropriate criteria of evaluation of through-hardenability and mutual comparison of steels. Lamont and Assimow designed special diagrams which enable an engineer to prescribe a suitable high-tempering temperature for heat-treatment steels ensuring the desired mechanical properties with respect to the mass of the machine part and intensity of the cooling medium. The paper presents results regarding cooling intensities of some oils of domestic production and of polymeric water solutions. Numerous temperature measurements on heat-treatment steel specimens with different masses were made. They provided very important information on cooling rates for a material when using different quenching agents. The cooling rates attained for a steel permit, for a given steel with a known continuous cooling diagram, determination of microstructural changes, and consequently prediction of mechanical properties of the steel.

Key words: heat treatment steel, quenching agent, microhardness, cooling rate, cooling intensity

1 UVOD

Mehanske lastnosti jekel so funkcija kemične sestave in mikrostrukture kot posledice različnih fizikalnih procesov pri predelavi jekla in njegovi toplotni obdelavi. Toplotna obdelava, kot zelo pomemben korak pri razvoju proizvodnih procesov, je dandanes dobro obvladljiv in večinoma avtomatiziran postopek v fazi segrevanja in zadrževanja obdelovancev na temperaturi avstenitizacije, medtem ko na potek procesa ohlajanja oziroma gašenja, ki prevladujoče vpliva na končne lastnosti izdelka, vplivajo številne fizikalne in tehnološke spremenljivke. Vse ostreje zahteve uporabnikov o zagotavljanju predpisanih mehanskih lastnosti in obratovalnih sposobnostih strojnih delov in proizvodov zahtevajo iskanje povezav med sestavo, mikrostrukuro in poznanje zaostalih napetosti na osnovi dobrega poznanja procesa gašenja. Ohlajanje oziroma gašenje strojnega dela s hitrostjo ohlajanja pri toplotni obdelavi, ki je večja od tiste na mirnem zraku, je zelo pomembna faza pri določevanju njegovih lastnosti. Vsem vrstam toplotnih obdelav z gašenjem so skupne nove nastale mikrostrukture, ki se ne ujemajo s termodinamičnim ravnotežnim ohlajanjem. Na lastnosti strojnega dela lahko vplivamo tudi z izbiro različnih jekel, ki so definirane

z vrsto in količino legirnih elementov, s čimer vplivamo na temperaturne premene pri segrevanju in ohlajanju. Pri jeklih lahko z uporabo različnih sredstev za gašenje dosežemo širok razpon ohlajevalnih hitrosti v materialu, kar omogoča nastanek različnih mikrostruktur, od martenzitne do feritno-cementitno-karbidne. Za zagotavljanje ustreznih lastnosti strojnih delov je potrebna pravilna izbira hitrosti ohlajanja oziroma izbira ustreznega sredstva za gašenje jekel pri kaljenju^{1,2}. Fazne transformacije opisujemo z difuzijo ogljika, železa in legirnih elementov. Ohlajanje trdne raztopine avstenita s hitrostjo ohlajanja, ki je večja od kritične, zagotavlja nedifuzijske procese v jeklu pri toplotnih obdelavah. Posledica tega so nižje transformacijske temperature, kot je pri ravnotežnem ohlajanju, ki omogoča nastanek prenasičene trdne raztopine ogljika v tetragonalni kristalni mreži in mikrostrukuro, imenovano martenzit. Rezultat takega ohlajanja je povezan z nastankom metastabilnih faz pri neravnotežnem ohlajanju. V industrijski proizvodnji različnih strojnih delov iz jekel lahko torej z neravnotežnimi pogoji ohlajanja dosežemo pri njih želene mehanske lastnosti. Vrednotenje procesa toplotne obdelave opisujemo z zelenimi mikrostrukturnimi spremembami in možnimi stranskimi vplivi, kot so velikost in oblika deformacij in/ali notranje napetosti po

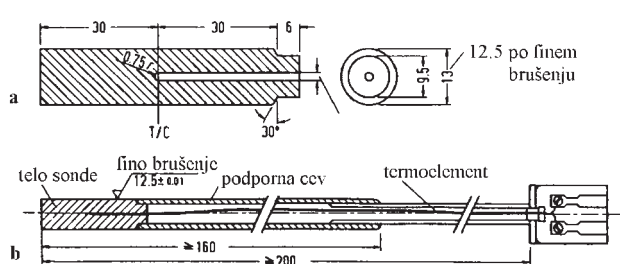
gašenju. Želene in neželene spremembe po gašenju lahko znatno vplivajo na obratovalno sposobnost strojnih delov. Glavni smoter toplotne obdelave je torej zagotovitev predvsem želene lastnosti strojnega dela, včasih pa omejujemo tudi stranske vplive, kot npr. velikost in potek zaostalih napetosti.

2 EKSPERIMENTALNI POSTOPEK

2.1 Ohlajevalne krivulje in hitrosti ohlajanja različnih hladilnih sredstev

Razvoj in preskušanje različnih hladilnih sredstev imata velik pomen pri toplotni obdelavi v smislu določevanja hitrosti ohlajanja v posameznih temperaturnih intervalih. S poznanjem fizikalnih pojavov v mejni plasti obdelovanec/hladilno sredstvo se lahko izognemo napakam pri toplotni obdelavi, kar vpliva na kvaliteto izdelka in na njegovo obratovalno dobo. Poznanje hladilnih sredstev z vidika intenzivnosti ohlajanja in fizikalnih pojavov v mejni plasti pri gašenju jekel lahko omogoči izboljššan nadzor nad tehnologijo toplotne obdelave. Za opis pojavov v mejni plasti med obdelovanecem in hladilnim sredstvom se danes uporabljajo različne metode. Tehniški komite znanstveno-tehnološkega razvoja o hladilnih sredstvih je v mednarodni zvezi za toplotno obdelavo, s kratico IFHT (International Federation of Heat Treatment), pripravil standard za laboratorijsko preskušanje hladilnih sredstev, ki je bil kasneje sprejet kot mednarodni standard ISO/DIS 9950³. Razvrščanje različnih sredstev za gašenje glede na njegove lastnosti pri ohlajanju se izvaja s preskusnim vzorcem iz določenega materiala, ki ima prirejeno velikost in obliko. Preskusni vzorci (v nadaljevanju sonda), so navadno iz materialov brez faznih transformacij v trdnem stanju. Tako se izognemo napakam pri določevanju intenzivnosti ohlajanja določenega hladilnega sredstva zaradi dodatnega izvira toplote zaradi faznih transformacij v temperaturnem intervalu ohlajanja vzorca. Na predpisano temperaturo segreto sondo nato z avtomatskim pomikom potopimo v hladilno sredstvo, da zagotovimo enake razmere pri imerziji in ponovljive ter primerljive rezultate pri ohlajanju. Predpisana oblika sonde z izmerami je podana na **sliki 1**.

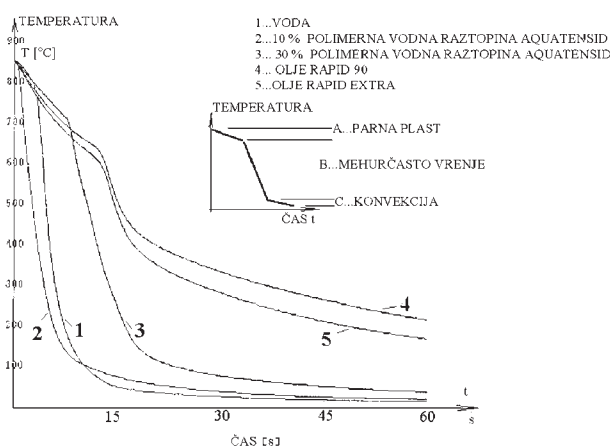
Sonda je valjaste oblike z izvrtino za vstavljanje ustrezno zaščitena termoelementa. Temperaturo med



Slika 1: Preskusna sonda: **a** detajl sonde, **b** sestavnica³
Figure 1: Test probe: **a** probe details, **b** general assembly³

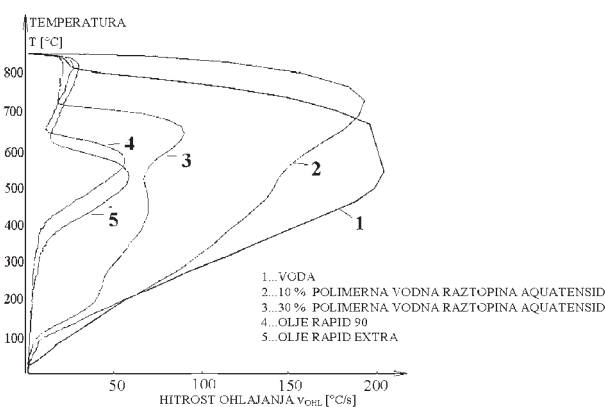
ohlajanjem merimo v središču sonde s termoelementom NiCr/Ni. Rezultati so predstavljeni na **sliki 2a in 2b** z ohlajevalno krivuljo v diagramu (T-t) in v diagramih, ki podajajo odvisnost med temperaturo in hitrostjo ohlajanja v hladilnem sredstvu ($T - v_{OHL}$). Pri raziskavi vpliva mase jekla in sredstev za gašenje na mehanske lastnosti jekel po toplotni obdelavi smo poleg dveh kalilnih olj in vode izbrali še dve polimerni vodni raztopini z različnima koncentracijama, domačega proizvajalca "Olma" iz Ljubljane.

Na **sliki 2a** so prikazane ohlajevalne krivulje, posnete pri ohlajanju sonde v različnih hladilnih sredstvih. Na isti sliki levo je prikazana značilna ohlajevalna krivulja z označenimi posameznimi fazami prestopa toplote iz segrete sonde na hladilno sredstvo. Iz ohlajevalnih krivulj lahko ugotovimo razlike pri toplotni prestopnosti pri ohlajanju iz sonde, segrete na temperaturo 850°C in



Slika 2a: Primerjava ohlajevalnih krivulj pri potopnem gašenju sonde iz Inconel 600 z izmerami $\phi 12,5 \times 60$ mm; preskušeno v različnih hladilnih sredstvih s temperaturo 25°C, brez mešanja

Figure 2a: Comparison of temperature - time curves for immersion quenching of an Inconel 600 alloy probe $\phi 12,5 \times 60$ mm in different quenching agent, tested at 25°C, without agitation



Slika 2b: Primerjava krivulj hitrosti ohlajanja pri potopnem gašenju sonde iz Inconel 600 z izmerami $\phi 12,5 \times 60$ mm; preskušeno v različnih hladilnih sredstvih s temperaturo 25°C, brez mešanja

Figure 2b: Comparison of cooling rate curves for immersion quenching of an Inconel 600 alloy probe $\phi 12,5 \times 60$ mm in different quenching agent, tested at 25°C, without agitation

nato ohlajene v hladilnem sredstvu, ki jih lahko opišemo s tremi fazami:

- temperaturno področje A pomeni začetno kontaktno fazo z relativno nepomembnim toplotnim prestopom med sondo in hladilnim sredstvom. V tem časovnem intervalu poteka prenos toplote na hladilno sredstvo s sevanjem skozi izolacijsko parno plast. Leidenfrostov pojav oziroma oblikovanje nepretrgane izolacijske parne plasti okoli sonde se pojavi v trenutku, ko odvedena toplota s površine vzorca prekorači količino toplote, potrebne za nastanek ustrezne stopnje nasičenosti parnih mehurčkov na enoto površine sonde;
- temperaturno področje B pomeni fazo porušitve parne plasti. Nastanejo okoliščine za najhitrejši prevod toplote iz sonde na hladilno sredstvo. V trenutku porušitve parne plasti nastopi burno vrenje hladilnega sredstva zaradi intenzivnega prenosa toplote s površine sonde na okoliško hladilno sredstvo. Velikost ter oblika parnih mehurčkov imata pomemben vpliv na potek faze B oziroma na hitrost ohlajanja sonde, ki poteka do vrelna temperature hladilnega sredstva;
- temperaturno področje C pomeni fazo, pri kateri je dosežena nižja hitrost ohlajanja, predvsem zaradi odvoda toplote preko površine sonde na hladilni medij s prevodom in konvekcijo. Temperaturna razlika med točko vrenja in delovno temperaturo hladilnega sredstva določa hitrost toplotnega prestopa med gašenjem.

Izbrani olji za gašenje sta prav tako od domačega proizvajalca Olma in sta poznani pod trgovskim imenom "Olmakal Rapid 90" in "Olmakal Rapid Extra". To sta visokokvalitetni kalilni olji, ki se uporabljata v odprtih kalilnih sistemih. Izdelani sta iz izbranih surovin z visokimi plamenišči in dobrimi ohlajevalnimi lastnostmi, ki povečujejo odvod toplote v območju visokih temperatur in upočasnjujejo odvod toplote v območju nižjih. S tem dosežemo po toplotni obdelavi oziroma gašenju izboljšano zrnatost jekla in zmanjšamo velikost deformacij ter velikost notranjih napetosti po kaljenju. Razmere pri ohlajanju so izjemno ugodne, tako, lahko vplivamo na zmanjšanje dimenzijskih sprememb vzorca in preprečimo nastanek razpok. Pri obeh kalilnih oljih opazimo zmanjšanje intenzivnosti ohlajanja v temperaturnem območju med 500 in 400°C, kar je izjemno ugodno z vidika notranjih napetosti v materialu med gašenjem.

Sredstvo za gašenje jekel pri toplotni obdelavi Aquatensid je sintetični koncentrat domačega proizvajalca Olme namenjen za toplotno obdelavo jekel in neželeznih zlitin. Polimerne vodne raztopine z večjo koncentracijo Aquatensid-a imajo intenzivnost ohlajanja zelo podobno oljem. V temperaturnem območju tvorbe martenzita je učinek ohlajanja zelo zmanjšan v primerjavi s čisto vodo. Zaradi tega so temperaturne napetosti med jedrom in površino med gašenjem znatno nižje, kar izključuje nastanek razpok in ugodno vpliva na

nastanek notranjih napetosti med toplotno obdelavo, kot tudi na nastanek zaostalih napetosti po toplotni obdelavi. Nastala polimerna plast omogoča enakomerno sproščanje parnega plašča in s tem se zmanjša prestop toplote s konvekcijo s površine obdelovanca. Nastanek parno izolacijskega sloja je reverzibilen proces, kar pomeni, da pri izenačeni temperaturi obdelovanca s temperaturo hladilnega sredstva ponovno preide v tekočo fazo. S tem učinkom dosežemo minimalno spremembo koncentracije polimerne vodne raztopine, kaljeni obdelovanci pa ohranijo čisto površino. Polimerne vodne raztopine Aquatensid-a se po priporočilih proizvajalca uporabljajo predvsem za kaljenje ogljikovih in malolegiranih jekel, ki po kaljenju v olju ne dajejo zelene mikrostrukture oziroma trdote. Polimerna vodna raztopina se prav tako uspešno uporablja za kaljenje strojnih delov srednjih mas in/ali zahtevnih oblik iz omenjenih jekel, pri katerih je velika verjetnost za nastanek razpok po gašenju delov v vodi. Zaradi negorljivosti polimernih vodnih raztopin je delo operaterja varno, kar pomeni veliko prednost v primerjavi z gašenjem v vodi ali olju. Druga zelo pomembna lastnost polimernih vodnih raztopin je, da z njimi ne onesnažujemo okolja in s tem odgovarjamo na vse ostrejša zahteva o varovanju okolja.

Na **sliki 2b** je prikazano spreminjanje hitrosti ohlajanja sonde v temperaturnem intervalu 850°C do 20°C v posameznih hladilnih sredstvih. Gašenje kaljenih delov v vodi (krivulja 1) poteka v temperaturnem intervalu med 650°C in 500°C z največjo hitrostjo, okoli 200C/s. Pri uporabi polimerne vodne raztopine z 10% koncentracijo Aquatensid-a (krivulja 2) se dosežejo najvišje hitrosti ohlajanja v temperaturnem območju med 750°C in 650°C, sicer pa je potek krivulje hitrosti ohlajanja zelo podobna tistim pri ohlajanju v vodi. Pri uporabi polimerne vodne raztopine s povečano koncentracijo Aquatensid-a se zmanjšujejo ohlajevalne hitrosti tako, da se pri 30% raztopini (krivulja 3) dosežejo hitrosti ohlajanja, ki so le nekoliko višje od tistih, ki se dosežejo pri gašenju v olju (krivulji 4 in 5).

2.2 Vpliv mase in izbranih hladilnih sredstev na potek temperature med ohlajanjem in potek mikrotrdote po prerezu valjastih vzorcev

2.2.1 Material

Za raziskavo smo izbrali legirano jeklo Cr-Mo za poboljšanje z oznako 42CrMo4. Jeklo je bilo dobavljeno v obliki palic premera $\phi 25\text{mm}$. Kemična sestava in temperatura kaljenja jekla sta podani v **tabeli 1**, primerjavo jekla z drugimi standardi pa je podana v **tabeli 2**.

2.2.2 Eksperimentalni sistem za merjenje temperature na značilnih mestih med gašenjem vzorcev

Za merjenje temperature med gašenjem smo izbrali enake premere vzorcev (25mm), ki se uporabljajo za preizkušanje prekaljivosti po Jominy-ju, in izbrali

Tabela 1: Kemična sestava in kalilna temperatura jekla za poboljšanje 42CrMo4

Table 1: Chemical composition and hardening temperature of heat-treatment steel 42CrMo4

Oznaka jekla	Kemična sestava [%]						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
42CrMo4	0,4	0,37	0,65	0,035	0,035	1,20	0,30
Kalilna temperatura [°C]	850						

Tabela 2: Primerjava jekla z drugimi standardi

Table 2: Comparison of designations of the steel in other standards

AISI	DIN	W. No
4140	42CrMo4	1.7225

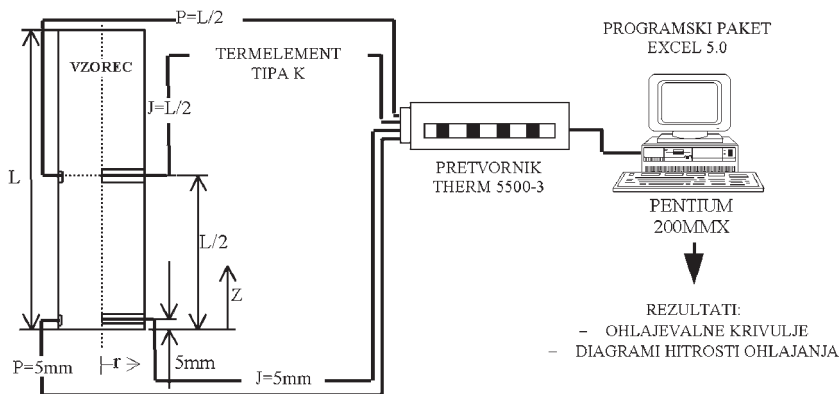
različne višine, in sicer 25mm, 50mm, 75mm in 100mm. Z izbranimi dimenzijami vzorcev vplivamo zaradi mase na potek temperature v vzorcu pri ohlajanju oziroma gašenju jekla. Pri tako izbranem eksperimentalnem postopku želimo določiti vpliv intenzivnosti ohlajanja hladilnega sredstva in prav tako vpliv mase valjastih vzorcev na nastanek mikrostrukture. Zaradi zahtev po napovedovanju poteka trdot oziroma dosežene trdnosti v različnih masah vzorcev smo v laboratoriju za toplotno obdelavo izdelali računalniško podprt eksperimentalni sistem, ki je prikazan na **sliki 3a**. Eksperimentalni sistem sestavljajo vzorci različnih mas, v katerih so na izbrana merilna mesta vstavljeni termoelementi za merjenje

značilnih temperaturnih prehodov med segrevanjem in ohlajanjem vzorcev preko večkanalnega temperaturnega pretvornika. Tako smo sposobni preko posnetih ohlajevalnih krivulj spremljati fizikalne pojave v mejni plasti za posamezno vrsto hladilnega sredstva. Temperaturne spremembe v vzorcu zaznavamo z namestitvijo štirih termoelementov na značilnih merilnih mestih valjastega vzorca, ki so povezani z devetkanalnim digitalno/analognim pretvornikom THERM 5500-3.

Izmerjene temperature smo nato preko serijskega vmesnika povezali z računalnikom in nato s programskim paketom Excel 5.0 obdelali podatke ter izdelali ustrezne prikaze rezultatov. Izmerjene temperature na različnih merilnih mestih vzorca omogočajo številne prikaze v diagramih temperaturnih odvisnosti od časa in hitrosti ohlajanja jedra ter površine vzorca. Zaradi velikega števila vzorcev različnih dimenzij in glede na številna merilna mesta smo se odločili za enotno označevanje vzorcev, kar omogoča enostavnejšo obravnavo podatkov in prav tako enostavnejše simbolne zapise v diagramih. Na **sliki 3b** je prikazan način označevanja posameznih merilnih mest z vstavljenimi termoelementi za merjenje temperature oziroma za določevanje hitrosti ohlajanja.

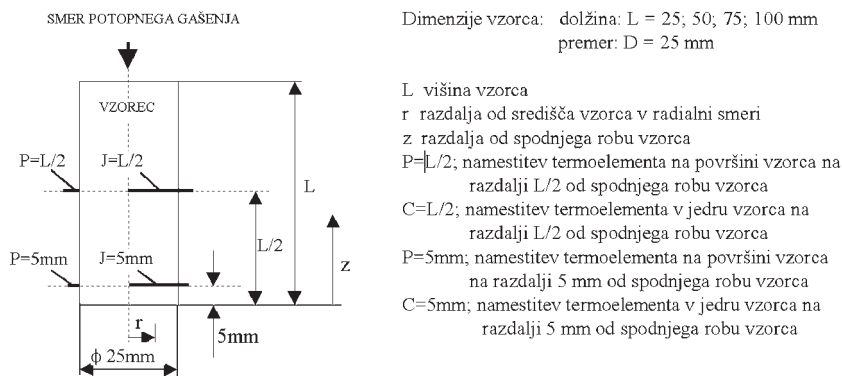
2.3 Vpliv vrste hladilnega sredstva na toplotno obdelavo

Pred začetkom preizkusa smo peč segreli na temperaturo 600°C. Nato smo vanjo vstavili vzorec z



Slika 3a. Merilni sistem za spremljanje krivulj ohlajanja na različnih merilnih mestih s termoelementi NiCr/Ni

Figure 3a. Measuring chain for generation of exactly defined cooling curves in different positions of thermocouples NiCr/Ni

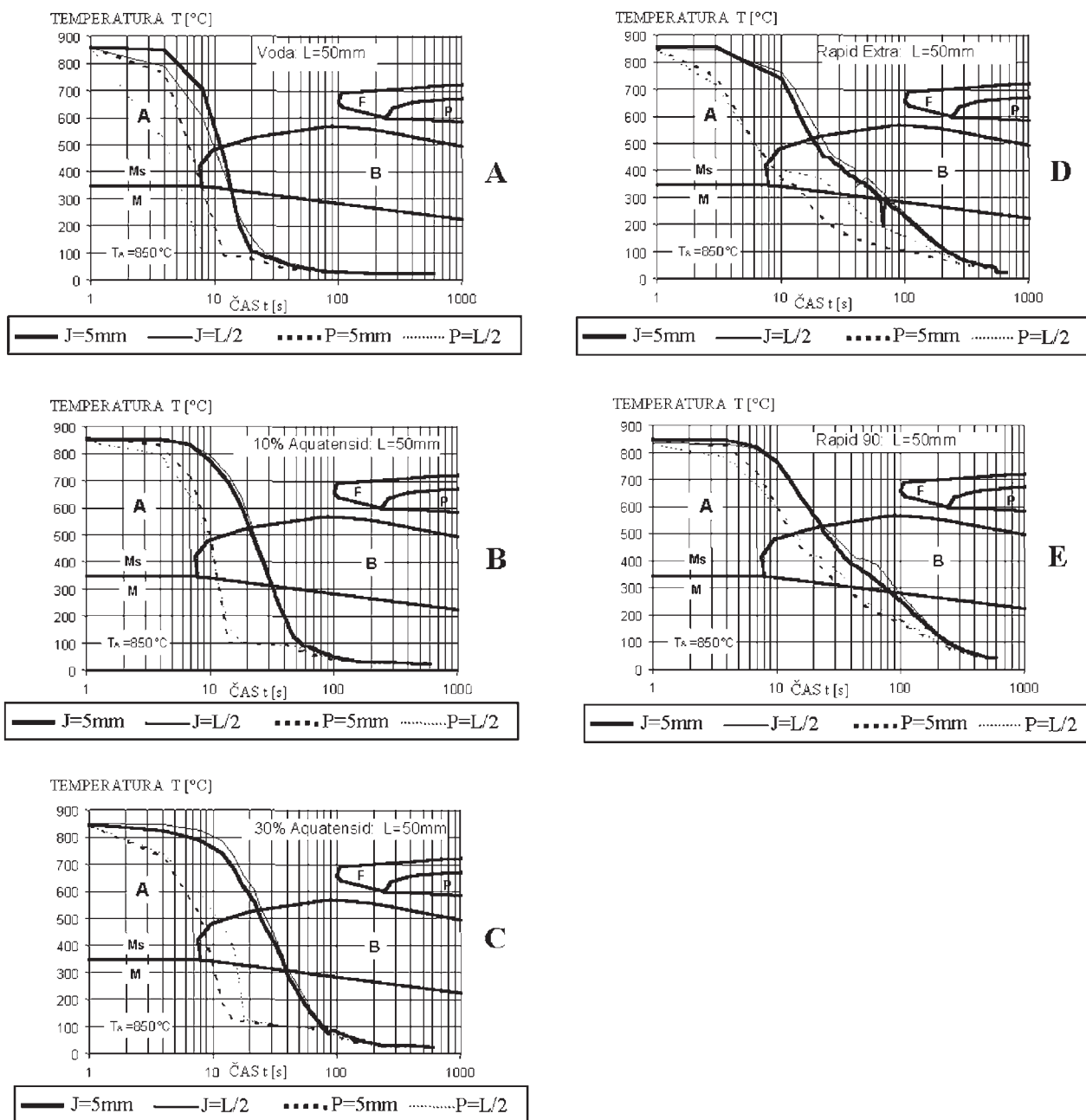


Slika 3b: Sistem za označevanje posameznih vzorcev in različnih dimenzij

Figure 3b: System for designation of particular samples and their different dimensions

vstavljenimi termoelementi na značilnih merilnih mestih in ga naprej segrevali do izenačenja te temperature in nato dogrevali in pregrevali na temperaturi avstenitizacije, ki je bila izbrana iz kataloga jekel in je 850°C. Tako smo zagotovili homogeno avstenitno mikrostrukturo po celotnem volumnu vzorca. Po pretečenem času segrevanja in pregrevanja smo vzorec potopili v izbrano hladilno sredstvo in ga gasili do temperature okolice. Z merilnim sistemom smo zapisovali časovno spreminjanje temperature, ki smo jih posredovali v računalnik za kasnejšo obdelavo in analizo podatkov. Na

sliki 4 so vrisani poteki ohlajevalnih krivulj v kontinuirnem ohlajevalnem diagramu za obravnavano jeklo za poboljšanje 42CrMo4 za različna ohlajanja v posameznih hladilnih sredstvih na posameznih merilnih mestih v vzorcu s premerom 25 mm in z višino 50 mm. Vrisane krivulje na diagramu predstavljajo časovno spreminjanje temperature za gašenje v vodi (A) v 10% polimerni vodni raztopini (B), v 30% polimerni vodni raztopini (C), v olju Rapid Extra (D) in v olju Rapid 90 (E).



Slika 4: Diagram kontinuirnega ohlajanja za legirano jeklo 42CrMo4 (temperatura avstenitizacije 850°C) z vrisanimi krivuljami ohlajanja, izmerjene na štirih merilnih mestih pri gašenju v petih različnih hladilnih sredstvih s temperaturo 25°C, brez mešanja

Figure 4: Continuous cooling diagram of the alloyed steel 42CrMo4 (avstenitizing temperature 850°C), with superimposed cooling curves measured in four different points of round bars cooled in five different quenching agent at 25°C, without agitation

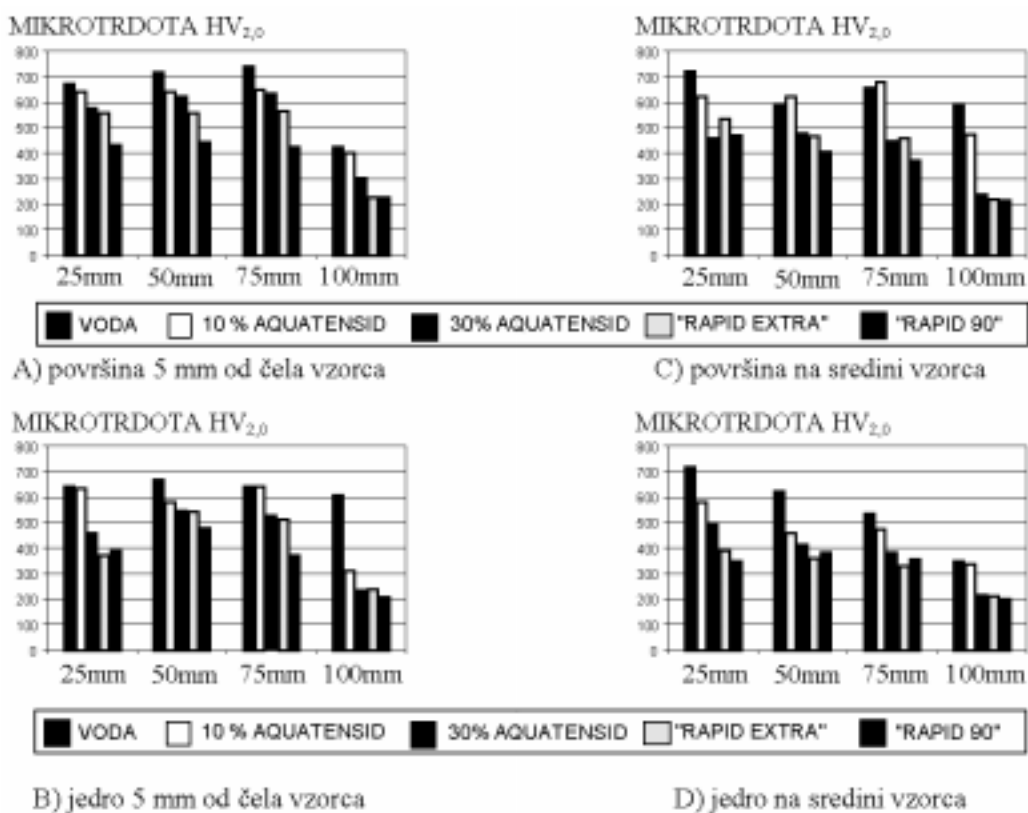
V posameznih diagramih, označenih od A do E, so vrisane krivulje časovnega spreminjanja temperature za dve merilni mesti, in sicer na površini vzorca, in za dve merilni mesti v jedru vzorca. Pri gašenju vzorca v vodi (**slika A**) z višino 50 mm dobimo na površini martenzitno mikrostrukturo, medtem ko v jedru bainitno martenzitno. Pri uporabi 10% oziroma 30% polimerne vodne raztopine za gašenje zagotavljamo na površini skoraj popolno martenzitno mikrostrukturo, ki pa proti jedru vzorca doseže prav tako kot pri gašenju v vodi martenzitno-bainitno. V primeru uporabe olja Rapid Extra smo dobili postopno spreminjanje martenzitno bainitne mikrostrukture z vse večjim deležem bainita proti sredini vzorca. Pri primerjavi olja Rapid Extra z oljem Rapid 90 smo lahko ugotovili zelo podobno mikrostrukturno stanje v kaljenem vzorcu, le da so temperaturne notranje napetosti med gašenjem v olju Rapid 90 znatno nižje. Ta ugotovitev je zelo pomembna pri zelo zahtevnih oblikah izdelkov, saj lahko preprečimo ali zmanjšamo deformacije, nastale med gašenjem vzorca oziroma obdelovanca.

Pri gašenju vzorcev v polimeri raztopini z 10% koncentracijo Aquatensid-a in prav tako pri gašenju v vodi ugotovimo nestabilnost parno izolacijskega sloja, kar ima za posledico zelo hiter transformacijski prehod v martenzitno področje. Na površini imerzijsko potopljenih vzorcev pa v obeh primerih gašenja opazimo

nekoliko počasnejši martenzitno transformacijski prehod na spodnjem robu oziroma čelu. Iz potekov posameznih posnetih ohlajevalnih krivulj pri gašenju vzorcev v vodi lahko dokaj uspešno napovemo tudi prekaljivost jekla. Napovedovanje prekaljivosti jekla iz posnetih ohlajevalnih krivulj pri gašenju v različnih ohlajevalnih sredstvih in s prikazom le-teh v kontinuirnem ohlajevalnem diagramu transformacij nam omogoča izbiro najprimernejšega postopka toplotne obdelave danega jekla. Rezultate toplotne obdelave z merjenjem temperature na značilnih mestih vzorcev lahko potrdimo z merjenjem mikrotrdote, prikazane v stolpičnih diagramih na **sliki 5**.

Rezultati mikrotrdote, prikazani v stolpičnem diagramu na **sliki 5**, vključujejo dva vpliva, in sicer:

- Vpliv mase, ki jo dobimo z vzorci istega premera in različnih višin. Tako imamo najmanjšo maso vzorca premera 25 mm in višine 25 mm. Ker je naslednja višina vzorca 50 mm je njegova masa dvakrat večja, pri naslednji višini vzorca 75 mm trikrat večja in pri višini vzorca 100 mm je masa štirikrat večja.
- Vpliv različnih sredstev za gašenje. Izbrali smo vodo, 10% in 30% polimerno vodno raztopino in dve vrsti olj. Skupaj torej pet ohlajevalnih sredstev, ki so bila v uvodu predstavljena z vidika ohlajevalne



Slika 5: Stolpični diagram dosežene mikrotrdote HV_{2,0} na različnih oddaljenostih od kaljenega čela glede na izbrano višino vzorcev 25/50/75/100 mm in pri različnih intenzivnosti ohlajanja hladilnega sredstva

Figure 5: Column diagram showing microhardness HV_{2,0} obtained at various cooling distances from the hardened front with reference to the height of the specimens, i.e. 25/50/75/100 mm, at different cooling intensities of the cooling medium

hitrosti in temperaturno časovnega poteka na standardni sondi.

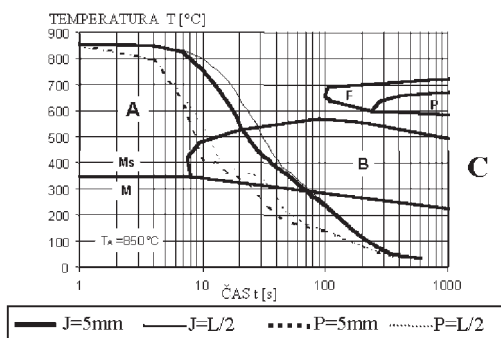
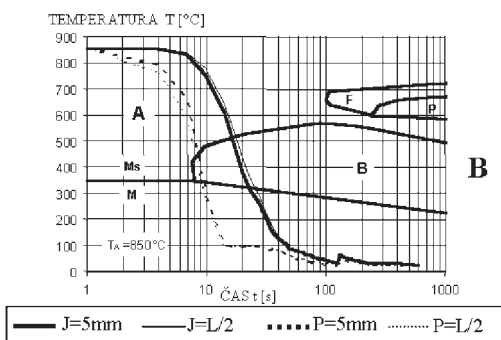
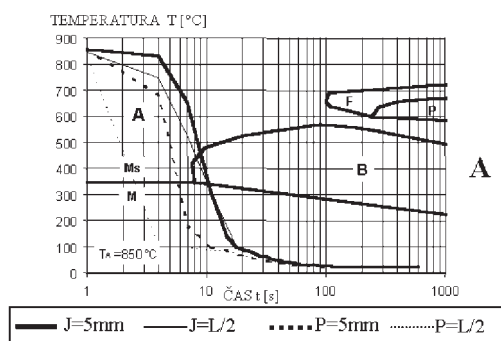
Merjenje mikrotrdot je bilo izvedeno na merilnih mestih za merjenje temperature, in sicer:

- A) na površini vzorca $z = 5\text{mm}$ od njegovega čela, [$z_s=5\text{mm}$]
- B) v jedru vzorca $z = 5\text{mm}$ od njegovega čela, [$z_c=5\text{mm}$]
- C) na površini vzorca pri višini $z = L/2$, [$z_s=L/2$]
- D) v jedru vzorca pri višini $z = L/2$, [$z_c=L/2$].

Intenzivnost ohlajanja v posameznih ohlajevalnih sredstvih povzroči nastanek zelene mikrostrukture in mikrotrdote na izbranem mestu vzorca. Stolpcični diagrami prikazujejo odvisnosti izmerjenih vrednosti

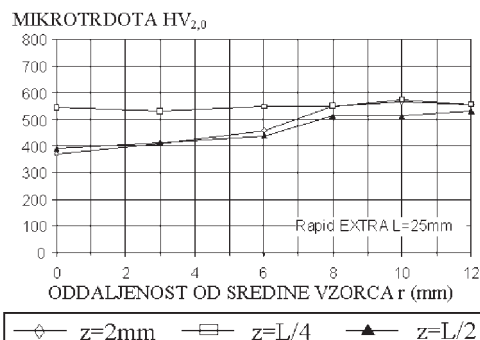
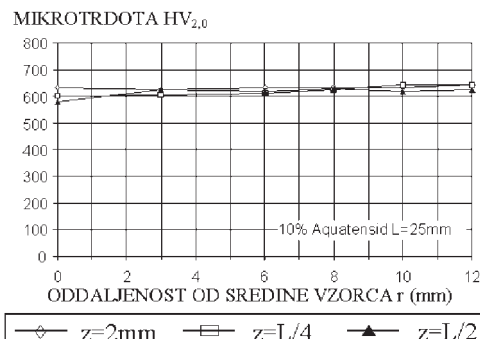
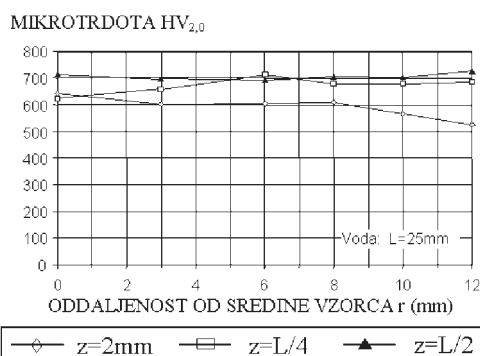
mikrotrdote na posameznih merilnih mestih vzorcev z različnimi višinami, torej vzorcev z različnimi masami, kaljenih v izbranih sredstvih za gašenje. Sredstvo z največjo intenzivnostjo ohlajanja je voda, temu ustrezno visoka pa je tudi izmerjena mikrotrdota.

Na **sliki 6.1** so prikazane ohlajevalne krivulje v kontinuirnem ohlajevalnem diagramu transformacij pri ohlajanju vzorca premera 25 mm in višine 25 mm za primer gašenja le-teh v vodi (**zgornja slika-A**), v 10% polimerni vodni raztopini (**srednja slika-B**) in v olju (**spodnja slika-C**). V splošnem lahko ugotovimo, da le pri gašenju v vodi dosežemo izjemno visoke temperaturne razlike med jedrom in površino, tako v sredini vzorca, kot na osrednjem delu čela vzorca. Zato v našem primeru pri gašenju vzorcev v vodi dobimo



Slika 6.1: Kontinuirano ohlajevalni diagram transformacij z vrisanimi ohlajevalnimi krivuljami ohlajanja na posameznih merilnih mestih za gašenje v vodi (A), 10% polimerni vodni raztopini Aquatensid(B) in olju Rapid Extra (C)

Figure 6.1: Continuous cooling diagram with time/temperature cooling curves at individual measuring points plotted for quenching in water (A), 10% polymeric water solution Aquatensid (B) and Rapid extra oil (C)



Slika 6.2: Izmerjene mikrotrdote po prerezu vzorca na različnih oddaljenostih od spodnjega robu vzorca po kaljenju v različnih hladilnih sredstvih

Figure 6.2: Curves of microhardness measured through the specimen cross-section at different distances from the hardened front in different cooling media

najvišje temperaturne napetosti pri ohlajanju, ki pa se jim pridružijo še notranje napetosti zaradi faznih transformacij. Velikosti notranjih napetosti zaradi faznih transformacij so močno odvisne od hitrosti ohlajanja v področju martenzitne transformacije. V idealnem primeru bi morali izbrati takšno sredstvo za gašenje jekel, ki bi imelo hitrost ohlajanja v neposredni bližini kritične hitrosti. Osnovno vprašanje, s katerim se srečujejo tehnologi pri kaljenju jekel, je, kako izbrati najprimernejše hladilno sredstvo z upoštevanjem mase in oblikovne zahtevnosti strojnega dela.

Slaba stran gašenja v vodi je neugoden potek hitrosti ohlajanja od temperature avstenitizacije do temperature okolice, ki ne ustreza kinetiki faznih transformacij. Pri ohlajanju vzorca v temperaturnem področju od 380°C do 100°C lahko ugotovimo, da maksimalna hitrost ohlajanja sovпада s temperaturnim področjem martenzitne transformacije, kar povzroči visoke notranje napetosti, ki v nekaterih primerih vodijo celo do deformacije vzorca. V primerih, ko se pri gašenju pojavlja nestabilni parno izolacijski sloj, lahko nastanejo tudi mehka področja v majhnem površinskem volumnu vzorca. Na **sliki 6.2** so prikazani izmerjeni poteki mikrotrdote v prečnem prerezu vzorcev na različnih višinah, in sicer pri $z=2$ mm, $z=L/4$ in $z=L/2$. Iz rezultatov izmerjene mikrotrdote v prečnem prerezu vzorca gašenega v vodi na različnih višinah lahko potrdimo, da je dosežena mikrotrdota v prečnem prerezu skoraj konstantna in je na površini med 700 in 730 HV_{2,0}, a v jedru med 630 in 710 HV_{2,0}. Najvišja trdota je dosežena v vzorcih, ki so bili gašeni v vodi, a nekoliko nižja v tistih, gašenih v 10% polimerni vodni raztopini, in znatno nižja v vzorcih, gašenih v olju Rapid Extra.

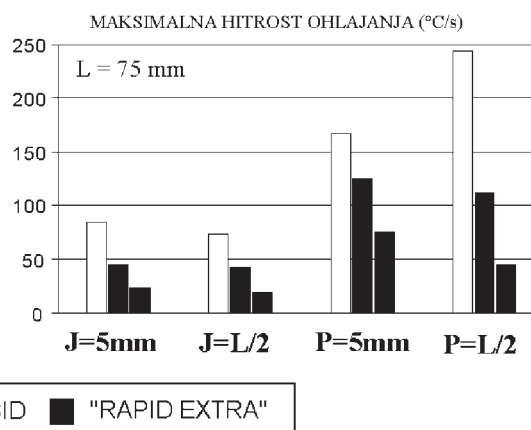
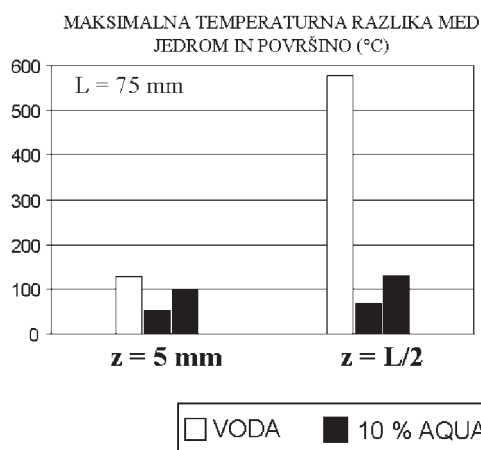
Iz poteka izmerjenih vrednosti mikrotrdot po prerezu vzorca na različnih oddaljenostih od kaljenega čela "z" lahko ugotovimo, da je najboljši prenos toplote iz vzorca dosežen pri gašenju v polimerni vodni raztopini. Za

polimerne vodne raztopine je značilno, da dosežemo pri gašenju vzorcev skoraj trenutno porušitev parno-izolacijskega sloja po celotni površini, kar zagotavlja enakomeren potek trdote po njegovem celotnem volumnu.

Če izhajamo iz Jominy-jevega preizkusa za ocenjevanje prekaljivosti jekel, potem je dosežena trdota na čelu preizkušanca med 750-780 HV. V vseh naših primerih imamo drugačen način ohlajanja vzorcev, kot je pri Jominy-jevem preizkušancu, zato je dosežena trdota pri naših vzorcih nekoliko nižja. Druga zelo pomembna razlika je, da pri Jominyjevem preizkusu ni možnosti za nastanek parnega sloja, zato je dodatno dosežena trdota na Jominyjevem preizkušancu višja, kot je v našem primeru. Iz navedenih ugotovitev lahko sklenemo, da je Jominyjev preizkus primeren le za relativno primerjavo prekaljivosti jekel, težja pa je uporaba podatkov o prekaljivosti za iskanje vrste sredstva za gašenje in načina gašenja.

Na **sliki 7.1** so v stolpičnem diagramu prikazane maksimalne temperaturne razlike med jedrom in površino na sredini vzorca ($z=L/2$) in maksimalne temperaturne razlike na njegovem čelnem robu ($z=5$ mm). Na **sliki 7.2** so prav tako v stolpičnem diagramu prikazane maksimalne dosežene ohlajevalne hitrosti, dosežene od temperature avstenitizacije do temperature okolice. V obeh stolpičnih diagramih imamo podane za maksimalno temperaturno razliko med jedrom in površino prav tako za maksimalno dosežene ohlajevalne hitrosti med gašenjem jekla. Rezultati maksimalnih temperaturnih razlik in maksimalne hitrosti ohlajanja se nanašajo na razmere pri gašenju vzorcev z višino 75mm, pri čemer je izvedeno ohlajanje v vodi, 10% polimerni vodni raztopini in v olju Rapid Extra.

Po pričakovanju so maksimalne temperaturne razlike na čelnem delu vzorca med jedrom in površino v mejah med 70 in 130°C, pri čemer je po pričakovanju dosežena



Slika 7.1: Stolpični diagram maksimalnih temperaturnih razlik med jedrom in površino za tri različna ohlajevalna sredstva (voda, 10% Aquatensid, olje Rapid Extra)

Figure 7.1: Column diagram of maximum temperature differences between the core and the surface for three different cooling media (Water, 10% Aquatensid, Rapid Extra oil)

Slika 7.2: Stolpični diagram maksimalnih hitrosti ohlajanja za tri različna ohlajevalna sredstva (voda, 10% Aquatensid, olje Rapid Extra)

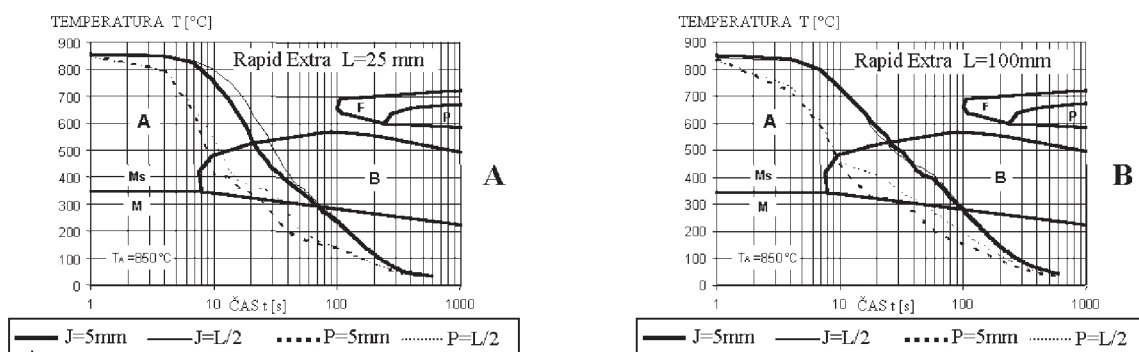
Figure 7.2: Column diagram of maximum cooling rates for three different cooling media (Water, 10% Aquatensid, Rapid Extra oil)

največja razlika pri ohlajanju v vodi. Najnižje temperaturne razlike med jedrom in površino so dosežene pri gašenju v 10% polimerni vodni raztopini. Pri ohlajanju vzorcev v vodi dobimo ekstremno visoke maksimalne temperaturne razlike med površino in jedrom, ki je okoli 580°C. Nasprotno pa pri ohlajanju vzorcev v olju (Rapid Extra) in v 10% polimerni vodni raztopini dobimo komaj opazno povišanje vrednosti maksimalnih temperaturnih razlik po višini celotnega vzorca. Tako lahko ugotovimo, da je pri ohlajanju vzorca v polimerni vodni raztopini dosežena maksimalna temperaturna razlika okoli 70°C, medtem ko je le-ta pri ohlajanju v olju nekoliko višja in je okoli 130°C. Najvišje temperaturne razlike med jedrom in površino se pojavijo med ohlajanjem v vodi, in sicer na razdalji L/2 od kaljenega čela vzorca. Večja temperaturna razlika na razdalji L/2 v primerjavi s temperaturno razliko na čelu vzorca je posledica zelo intenzivnega radialnega prenosa toplote na tem mestu. Na oddaljenosti 5mm od kaljenega čela pa poleg radialnega nastane tudi intenziven aksialni odvod toplote, kar zagotavlja enakomerno ohlajanje v prečni smeri vzorca.

Na **sliki 7.2** so na istem vzorcu z višino $L = 75$ mm prikazane maksimalne hitrosti ohlajanja v jedru in na površini na višini $z = 5$ mm in $z = L/2 = 37,5$ mm. Rezultati izračunov maksimalnih hitrosti ohlajanja potrjujejo, da so le-te znatno nižje v jedru kot na površini. Če primerjamo maksimalne hitrosti ohlajanja na čelu vzorca potem je pri ohlajanju v vodi le-ta na površini 150°C/s, a v jedru 85°C/s. V primerjavi hitrosti ohlajanja na sredini vzorca, ohlajenega v vodi, lahko ugotovimo znatno večje razlike. Na površini osrednjega dela vzorca je dosežena maksimalna hitrost ohlajanja 245°C/s a v jedru 125°C/s. Pri uporabi 10% polimerne vodne raztopine so dosežene maksimalne hitrosti ohlajanja znatno nižje. Najnižje vrednosti maksimalnih hitrosti ohlajanja pa dosežemo v olju Rapid Extra, ki pa ne zagotavljajo kritične hitrosti in tako ne nastane martenzitna mikrostruktura na površini vzorcev.

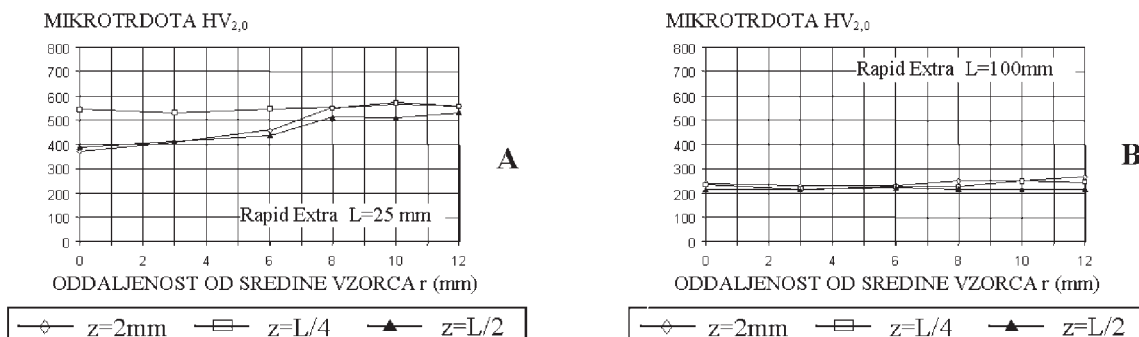
2.4 Vpliv mase na razmere pri ohlajanju jekla

Poleg vpliva vrste hladilnih sredstev pri gašenju jekla za poboljšanje 42CrMo4 smo želeli ugotoviti še vpliv mase vzorca na nastanek mikrostrukture za izbrani



Slika 8: Kontinuirani ohlajevalni diagram transformacij za legirano jeklo 42CrMo4 (temperatura avstenitizacije 850°C) z vrisanimi ohlajevalnimi krivuljami pri ohlajanju v olju Rapid Extra (vzorci z višino $L = 25$ mm (A) in $L = 100$ mm (B))

Figure 8: Continuous cooling diagram of the alloyed steel 42CrMo4 (avstenitizing temperature 850°C), with superimposed cooling curves during cooling sample in oil Rapid Extra (sample height $L = 25$ mm (A) and $L = 100$ mm (B))



Slika 9: Potek mikrotrdotne po prerezu vzorca "r" na različnih oddaljenostih od kaljenega čela "z" po ohlajanju v olju Rapid Extra (vzorci z višino $L = 25$ mm (a) in $L = 100$ mm (B))

Figure 9: Microhardness versus distance from the specimen centre "r" in different distance from the quenched end "z" after of sample cooling in Rapid Extra oil (sample height $L = 25$ mm (A) and $L = 100$ mm (B))

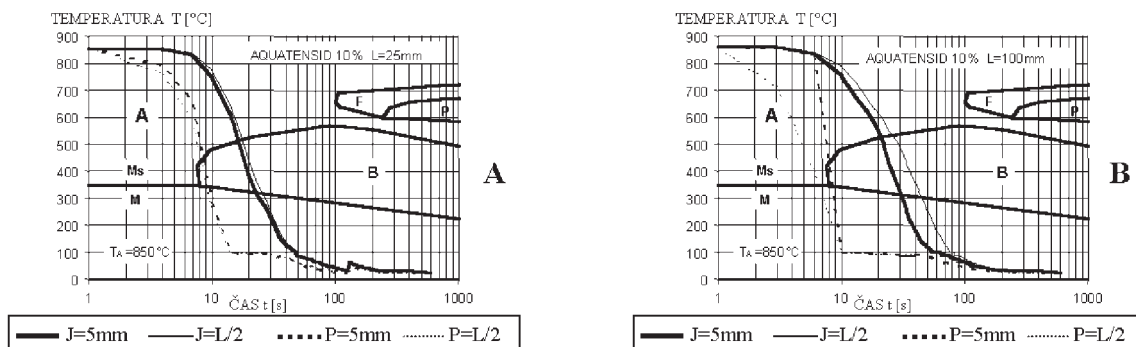
proces toplotne obdelave. Na **sliki 8** so v kontinuirnem diagramu transformacij vrisane ohlajevalne krivulje za dva vzorca, in sicer za najmanjšo višino 25 mm (**slika 8A**) in največjo 100 mm (**slika 8B**), ki sta bila gašena v olju Rapid Extra. Iz poteka izmerjenih ohlajevalnih krivulj lahko potrdimo, da je po pričakovanju proces ohlajanja nekoliko hitrejši v vzorcu z višino 25 mm kot z višino 100 mm. Zelo pomembna je dosežena sprememba v mikrostrukturi in mikrotrdoti, ki jo dosežemo v vzorcih z različnimi masami.

Tako imamo na **sliki 9** prikazano spreminjanje mikrotrdote v prečnem prerezu vzorca na različnih merilnih mestih. **Slika 9A** podaja potek mikrotrdote v vzorcu višine 25mm in **slika 9B** mikrotrdote v vzorcu višine 100mm. Razlike v dejanskih hitrostih ohlajanja v posameznih vzorcih potrjujejo tudi izmerjeni poteki mikrotrdote v prečnem prerezu v vzorcu na različnih višinah "z". Iz podatkov poteka mikrotrdote po **sliki 9B** v prečnem prerezu lahko ugotovimo, da je pri večjem vzorcu zelo nizka in zelo enakomerna preko celotnega prečnega prereza in je med 200-270 HV_{2,0}, kar potrjuje neuspešno kaljenje. Nasprotno pa pri manjših masah vzorcev dosežemo mikrotrdoto na površini med 500 in 550 HV_{2,0}. To pa pomeni, da uporaba olja kot hladilnega

sredstva pri večjih masah vzorcev in standardnih razmerah ohlajanja brez mešanja ne zagotavlja uspešnega kaljenja.

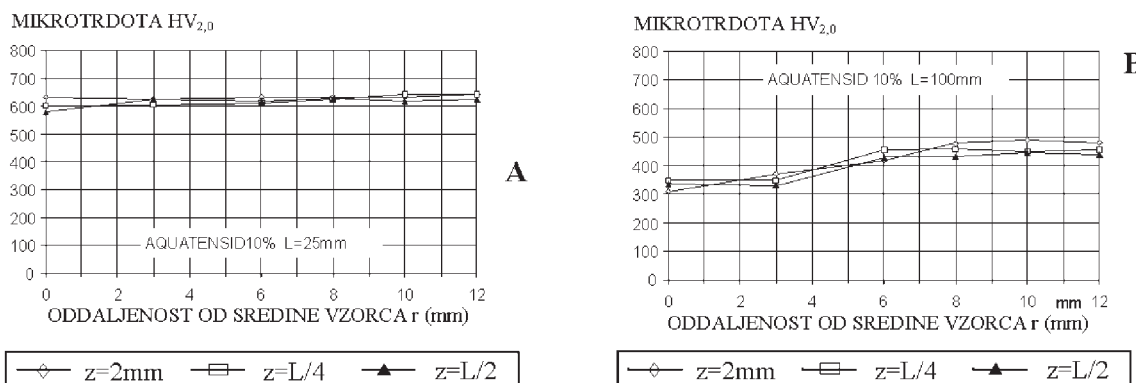
Na **sliki 10.1** so v kontinuirnem ohlajevalnem diagramu transformacij vrisane ohlajevalne krivulje za dva vzorca z najmanjšo višino 25 mm (**slika 10.1A**) in za višino 100 mm (**slika 10.1B**), ki sta bila ohlajena v 10% polimerni vodni raztopini. Ohlajevalne krivulje so znatno bolj strme pri ohlajanju vzorca v polimerni vodni raztopini kot v primeru ohlajanja vzorca v olju. Posledica bolj strme ohlajevalne krivulje je nastanek večjih temperaturnih napetosti, kot tudi napetosti zaradi faznih transformacij. Čeprav pri ohlajanju vzorca v 10% polimerni vodni raztopini dosežemo hitrosti, ki so skoraj enake kritični hitrosti ohlajanja samo v tankem površinskem sloju, šele potem lahko sklepamo o zadovoljivi doseženi trdoti v prečnem prerezu vzorca. Majhne razlike v dejanskih hitrostih ohlajanja v vzorcu z višino 25 mm dajejo nekoliko večje vrednosti mikrotrdot v njegovem prečnem prerezu, kot pri ohlajanju v olju.

Dosežena mikrotrdota v prečnem prerezu po ohlajanju v 10% polimerni vodni raztopini je okoli 680-740 HV_{2,0} (**slika 10.2.A**). Na **sliki 10.2.B** je prikazan potek mikrotrdote v prečnem prerezu vzorca z največjo



Slika 10.1: Kontinuirani ohlajevalni diagram transformacij z vrisanimi krivuljami ohlajanja pri gašenju v 10% polimerni vodni raztopini Aquatensid-a (vzorci z višino L = 25mm (A) in L = 100mm (B))

Figure 10.1: Continuous cooling diagram with superimposed cooling curves during cooling of sample in 10% polymeric water solution Aquatensid (sample height L=25mm (A) and L=100mm (B))



Slika 10.2: Potek mikrotrdote po prerezu vzorca "r" na različnih oddaljenostih od kaljenega čela "z"

Figure 10.2: Microhardness versus distance from the specimen centre "r" in different distance from the quenched end

višino 100mm. Neenakomeren potek mikrotrdote v prečnem prerezu vzorca z največjo višino je povezan z upočasnjanim ohlajanjem, ki ne zagotavlja martenzitne preobrazbe pri kaljenju. Tako je dosežena mikrotrdota v jedru vzorca od 300-350 HV_{2,0}, a na površini med 450-500 HV_{2,0}.

3 SKLEP

Toplotna obdelava kovinskih materialov je zelo pomembna tehnologija, s katero dosežemo spremembo njihovih mehanskih lastnosti. Vse večje zahteve uporabnikov po daljši obratovalni dobi delov orodij ali konstrukcijskih elementov zahtevajo razvoj ustreznih materialov in tehnologij. Zato je zelo pomembno, da v sklopu obdelovalne tehnologije čim bolj spoznamo obdelovalne procese, s katerimi moramo obdelati surovec (material) v končno stanje (izdelek) s predpisanimi lastnostmi, še prav posebno pa dobro poznanje različnih procesov v postopku toplotne obdelave.

Eksperimentalni postopek združuje sestavine ugotavljanja prekaljivosti po lastni zasnovi, ki vključuje tudi informacije o izbranem sredstvu za gašenje. Namen raziskav je bil preučiti vpliva mase in hladilnih sredstev na proces ohlajanja in posredno vpliv na mehanske lastnosti jekel po toplotni obdelavi. V ta namen smo izbrali vzorce z štirimi različnimi višinami. Temperaturo ohlajanja smo spremljali s termoelementi neposredno na vzorcu. Iz poteka ohlajevalnih krivulj smo določili časovni potek temperature pri ohlajanju v srednjem delu vzorcev, kot tudi na njihovem čelu. Celostna analiza nam daje dober vpogled v razmere pri ohlajanju vzorcev oziroma pri toplotni obdelavi jekel zaboljšanje in omogoča uspešno napovedovanje pogojev za toplotno obdelavo s ciljem, da zagotovimo želene mehanske lastnosti strojnih delov.

Celostno analizo lahko izvedemo z določevanjem intenzivnosti ohlajanja hladilnih sredstev z upoštevanjem vpliva mase vzorcev na potek dosežene mikrotrdote v

prečnem prerezu. S Quenchtostom (IVF) smo določili intenzivnost ohlajanja posameznih hladilnih sredstev in ugotovili primernost posameznih hladilnih sredstev za toplotno obdelavo obravnavanega jekla z različnimi masami.

Lastnosti polimernih vodnih raztopin smo prilagajali s spreminjanjem koncentracije samega sredstva. Polimerna koncentracija z 10% Aquatensid-a ima ohlajevalno karakteristiko podobno, kot jo dosežemo pri ohlajanja vzorca v vodi, vendar z zmanjšanimi negativnim učinkom nastajanja parnega sloja med ohlajanjem. Pri večjih koncentracijah polimernih vodnih raztopin pa se ohlajevalne lastnosti približujejo ohlajevalni intenzivnosti kalilnih olj.

Z mikrostrukturno analizo in merjenjem mikrotrdote smo potrdili razmere pri ohlajanju vzorcev z različnimi masami. S stališča prekaljivosti, to je spreminjanje mikrotrdote po osrednjem delu vzorca, lahko ugotovimo, da so polimerne vodne raztopine za gašenje zelo uspešne, ker nam zagotavljajo skoraj enakomerno ohlajanje po celotnem prerezu vzorca. Prav tako pa polimerne vodne raztopine zagotavljajo zelo ugodno razmerje med ohlajevalno hitrostjo in temperaturno razliko med jedrom in površino, kar zmanjšuje nevarnost nastajanja deformacije vzorcev zaradi notranjih napetosti med toploto obdelavo, kot tudi nižje zaostale napetosti po toplotni obdelavi strojnega dela.

4 LITERATURA

- ¹ Hougardy H.: Umwandlung und Gefüge unlegierter Stähle, eine Einführung, Theory and Technology of Quenching, Handbook, Ed.: Liščić B., Tensi H.M., Luty W., Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, **1992**
- ² Sverdlin A. V., Ness A. R.: Fundamental Concepts in Steel Heat Treatment, Steel Heat Treatment Handbook, Ed.: Totten G. E., Howes M. A. H., Marcel Dekker, New York, Basel, **1997**
- ³ Segerberg S.: Industrial Quenching Oils-Determination of Cooling Characteristics-Laboratory Test Method, Draft Int. Standard ISO/DIN 9950, Theory and Technology of Quenching, Handbook, Ed.: Liščić B., Tensi H. M., Luty W., Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, **1992**