

UNIVERZA V NOVI GORICI
POSLOVNO-TEHNIŠKA FAKULTETA

DIPLOMSKA NALOGA

ANALIZA SNOVNIH LASTNOSTI DVEH VZMETNIH JEKEL

Egon Batistič

Mentor: Prof. dr. Božidar Šarler

Nova Gorica, 2007

IZVLEČEK

Sodobna tehnologije nam pomagajo na številnih področjih. Tako nam je tehnologija numeričnega modeliranja priskočila na pomoč tudi na področju litja jekel. Z ustrezno programsko opremo lahko v zadnjem desetletju izračunamo celo snovne lastnosti poljubnega jekla. V diplomski nalogi najprej obravnavamo osnovno pridobivanje surovega železa in predelavo le tega v različna jekla z vrsto različnih lastnosti. Predstavljene so osnovne lastnosti jekla, kot so trdota, žilavost, natezna trdnost itd. Predvsem so opisane lastnosti nerjavnih jekel ter najpomembnejše vrste le teh. S pomočjo posebne računalniške programske opreme imenovane JMatPro izračunamo snovne lastnosti jekel 50CrV4 in 51CrMoV4/52CrMoV4 in primerjamo rezultate med seboj. Lastnosti se delijo na jekla, ki so bila normalno ohlajena in na kaljena jekla. Podatki so prikazani primerjalno tako, da so razlike jasno razvidne. Primerjali smo mikrostrukturne faze, trdote, gostoto, specifično toploto, toplotno prevodnost in linearni raztezek. Največje razlike med obema jeklama nastopajo med prehodi agregatnih stanj in pri spremembi kristalne zgradbe (mikrostrukture). Po kaljenju nastanejo največja razhajanja na področju trdote, natezne trdnosti in 0,2 % nateznega preizkusa.

ABSTRACT

Modern technologies help us in numerous fields. Consequently, numerical modelling aids us in the field of steel casting. In the past decade, we have even been able to calculate the material properties of any type of steel using appropriate software. In this thesis, we will first address the basic extraction of pig iron and its processing into various types of steel with a broad spectrum of properties. The basic properties of steel such as hardness, toughness, tensile strength and others are presented. Emphasis is given on the properties of stainless steel and its most important types. In the final part of the thesis, we will be using JMatPro, a specialized computer software, to calculate the material properties of the 50CrV4 and the 51CrMoV4/52CrMoV4 steel and to compare the results. Properties are divided into steel types that have been cooled down normally and steel types that have been quenched. The data is presented in a comparable way, making differences easily

noticeable. We have compared micro-structural phases, hardness, density, specific heat, heat conductivity and linear expansion. Largest differences between steel types are noted during transitions between states of matter and during changes in the crystalline structure (microstructure). After quenching largest differences in hardness, tensile strength and 0.2 % tensile test are noted.

KLJUČNE BESEDE

jeklo, železo, žilavenje jekla, legiranje jekla, legirni elementi, ogljik (C), mikrostruktura, avstenit, martenzit, ferit, bainit, perlit, trdota, žilavost, nerjavna jekla, kapljevina, trdno stanje, 0,2 % preizkus razteznosti, gostota, specifična toplota, toplotna prevodnost, linearni raztezek, visoka temperatura, kaljenje

KEY WORDS

steel, iron, steel refining, steel alloy, alloy element, carbon (C), microstructure, austenite, martensite, ferrite, bainite, perlite, hardness, toughness, stainless steel, liquid, solid, 0,2 % proof stress, density, specific heat, thermal conductivity, linear expansion, high temperature, tempering

KAZALO:

1	UVOD	1
2	PROIZVODNJA JEKLA	2
2.1	Proizvodnja jekla v Sloveniji	2
2.2	Proizvodnja železa	3
2.3	Proizvodnja jekla – žilavenje železa	5
2.3.1	Procesi med žilavenjem.....	6
2.3.2	Žilavenje v Martinovki.....	9
2.3.3	Žilavenje v elektroobločnih pečeh	9
2.3.4	Žilavenje v konvertorju	10
3	RAZDELITEV JEKEL	12
3.1	Razdelitev po kemični sestavi.....	12
3.1.1	Ogljikova (nelegirana) jekla.....	12
3.1.2	Legirana jekla.....	14
3.2	Delitev jekel glede na mikrostrukturo	15
3.2.1	Feritna jekla.....	15
3.2.2	Avstenitna jekla.....	16
3.2.3	Martenzitno jeklo	17
3.2.4	Cementit	17
3.2.5	Perlit	18
3.2.6	Bainit.....	18
3.3	Delitev jekel po namenu uporabe.....	19
3.3.1	Konstruktivna jekla.....	19
3.4	Orodna jekla	20
3.4.1	Ogljikova orodna jekla za delo v hladnem.....	20
3.4.2	Legirana orodna jekla za delo v hladnem	21
3.4.3	Legirana orodna jekla za delo v vročem	21
3.4.4	Hitrorezna orodna jekla.....	21
4	LASTNOSTI JEKEL	22
4.1	Trdota	22
4.2	Žilavost.....	23

4.3	Korozija.....	24
5	NERJAVNA JEKLA.....	26
5.1	Proizvodnja nerjavnih jekel.....	26
5.2	Avstenitno–martenzitna transformacija	27
5.2.1	Zlitine Fe-Cr.....	27
5.2.2	Zlitine Fe-Cr-Ni	28
5.3	Vrste nerjavnih jekel	29
5.3.1	Martenzitna nerjavna jekla	29
5.3.2	Feritna nerjavna jekla	30
5.3.3	Avstenitna nerjavna jekla	30
5.3.4	Nerjavna jekla s kontrolirano transformacijo.....	31
6	RAČUNALNIŠKI PROGRAM JMatPro.....	32
6.1	Možnosti računanja računalniškega programa JMatPro	34
6.1.1	Razširjene fizikalne lastnosti.....	34
6.1.2	Mehanske lastnosti	34
6.1.3	Fazne transformacije	35
7	PRIMERJAVA SNOVNIH LASTNOSTI JEKEL 50CrV4 IN 51CrMoV4/52CrMoV4	36
7.1	Opis jekla 50CrV4.....	36
7.2	Opis jekla 51CrMoV4/52CrMoV4	36
7.3	Primerjava snovnih lastnosti jekel 50CrV4 in 51CrMoV4/52CrMoV4 pri normalnem ohlajanju.....	37
7.3.1	Primerjava gostote.....	38
7.3.2	Primerjava specifične toplote	39
7.3.3	Primerjava toplotne prevodnosti	41
7.3.4	Primerjava linearnega raztezka	42
7.3.5	0,2 % natezni preizkus pri visoki temperaturi.....	43
7.4	Primerjava snovnih lastnosti jekel 50CrV4 in 51CrMoV4/52CrMoV4 po kaljenju	44
7.4.1	Primerjava gostote po kaljenju.....	46
7.4.2	Toplotna prevodnost po kaljenju.....	47

7.4.3	Primerjava specifične toplote po kaljenju	48
7.4.4	Jominyjev preizkus kaljivosti.....	49
7.4.5	Primerjava trdote po kaljenju	51
7.4.6	Primerjava natezne trdnosti po kaljenju	52
7.4.7	Primerjava 0,2 % nateznega preizkusa po kaljenju.....	53
8	PRIMERJAVA SNOVIH LASTNOSTI JEKEL 50CrV4 IN 50CrV4 + 10 %....	54
8.1	Primerjava snovnih lastnosti jekel 50CrV4 in 50CrV4 + 10% pri normalnem ohlajanju	54
8.1.1	Primerjava gostote.....	56
8.1.2	Primerjava specifične toplote	57
8.1.3	Primerjava toplotne prevodnosti	58
8.1.4	Primerjava linearnega raztezka	59
8.1.5	0,2 % natezni preizkus pri visoki temperaturi.....	60
8.2	Primerjava snovnih lastnosti jekel 50CrV4 in 50CrV4 + 10 % po kaljenju ..	61
8.2.1	Primerjava gostote po kaljenju	63
8.2.2	Primerjava toplotne prevodnosti po kaljenju	63
8.2.3	Primerjava specifične toplote po kaljenju	64
8.2.4	Jominyjev preizkus kaljivosti.....	65
8.2.5	Primerjave trdote po kaljenju	67
8.2.6	Primerjava natezne trdnosti po kaljenju	68
8.2.7	Primerjava 0,2 % nateznega preizkusa po kaljenju.....	69
9	PRIMERJAVA TRDOT JEKEL 50CrV4, 50CrV4-V, 50CrV4-Cr IN 50CrV4-Mn	70
9.1	Primerjava trdot jekel 50CrV4 in 50CrV4-V	71
9.1.1	Primerjava Jominyjevega preizkusa kaljivosti.....	71
9.1.2	Primerjava trdot po kaljenju	72
9.2	Primerjava jekla 50CrV4 in jekla 50CrV4-Cr	75
9.2.1	Primerjava Jominyjevega preizkusa kaljivosti.....	75
9.2.2	Primerjava trdot po kaljenju	76
9.3	Primerjava trdot jekel 50CrV4 in 50CrV4-Mn	78
9.3.1	Primerjava Jominyjevega preizkusa kaljivosti.....	78
9.3.2	Primerjava trdot po kaljenju.....	80

9.4	Primerjava trdot jekel 50CrV4 in 50CrV4-Ni.....	83
9.4.1	Primerjava Jominyjevega preizkusa kaljivosti.....	83
9.4.2	Primerjava trdot po kaljenju.....	84
10	ZAKLJUČEK.....	87
11	LITERATURA.....	89

KAZALO TABEL:

Tabela 1:	Mejne vrednosti deležev legirnih elementov za razlikovanje legiranih in nelegiranih jekel	13
Tabela 2:	Mejne vrednosti deležev elementov za razlikovanje kakovostnih in specialnih legirnih jekel	15
Tabela 3:	Razdelitev legirnih elementov na gamagene in alfaagene	29

KAZALO SLIK:

Slika 1:	Postopek proizvodnje jekla.....	2
Slika 2:	Prostorsko kubična mikrostruktura - ferit (Vodopivec, 2002).....	16
Slika 3:	Ploskovno kubična mikrostruktura - avstenit (Vodopivec, 2002)	16
Slika 4:	Tetragonalno prostorninsko centrirana mikrostruktura - martenzit. (Vodopivec, 2002).....	17
Slika 5:	Ravnotežni diagram Fe-Cr (Kovač, 1999).....	27
Slika 6:	Ravnotežni diagram Fe-Ni (Kovač, 1999).....	28
Slika 7:	Začetno okno programa JMatPro.....	32
Slika 8:	Okno za vnašanje in računanje lastnosti	33

Slika 9: Spreminjanje mikrostrukturnih faz jekla 50CrV4 pri normalnem ohlajanju (prevod legende: liquid – tekočina; austenite – avstenit; MnS – spojina MnS; ferrite – ferit; cemetite – cemetit)	37
Slika 10: Spreminjanje mikrostrukturnih faz jekla 51CrMoV4/52CrMoV4 pri normalnem ohlajanju	37
Slika 11: Primerjava gostote jekel 50CrV4 in 51CrMoV4/52CrMoV4.....	39
Slika 12: Primerjava specifične toplote jekel 50CrV4 in 51CrMoV4/52CrMoV4....	40
Slika 13: Primerjava toplotne prevodnosti med jekli 50CrV4 in 51CrMoV4/52CrMoV4	41
Slika 14: Primerjava linearnega raztezka med jekli 50CrV4 in 51CrMoV4/52CrMoV4	42
Slika 15: Primerjava 0,2 % nateznega preizkusa pri visoki temperaturi jekel 50CrV4 in 51CrMoV4/52CrMoV4.	43
Slika 16: Mikrostrukturne faze jekla 50CrV4 po kaljenju (prevod legende: austenite – avstenit; ferrite – ferit; bainite – bainit; pearlite – perlit)	44
Slika 17: Mikrostrukturne faze jekla 51CrMoV4/52CrMoV4 po kaljenju.....	44
Slika 18: Primerjava gostot jekel 50CrV4 in 51CrMoV4/52CrMoV4 po kaljenju ...	46
Slika 19: Primerjava toplotne prevodnosti med jekli 50CrV4 in 51CrMoV4/52CrMoV4 po kaljenju	47
Slika 20: Primerjava specifične toplote jekel 50CrV4 in 51CrMoV4/52CrMoV4 po kaljenju	48
Slika 21: Prikaz Jominyjevega preizkusa kaljivosti.....	49
Slika 22: Diagram Jominyjevega preizkusa kaljivosti za jeklo 50CrV4 (prevod legende: 0,2 % poof stress – 0,2 % natezni preizkus; hardness – trdota; tensile stress – natezna trdnost)	50
Slika 23: Diagram Jominyjevega preizkusa kaljivosti za jeklo 51CrMoV4/52CrMoV4	50
Slika 24: Primerjava trdote jekel 50CrV4 in 51CrMoV4/52CrMoV4 po kaljenju....	51
Slika 25: Primerjava natezne trdnosti jekel 50CrV4 in 51CrMoV4/52CrMoV4 po kaljenju	52
Slika 26: Primerjava 0,2 % nateznega preizkusa pri jeklih 50CrV4 in 51CrMoV4/52CrMoV4 po kaljenju	53
Slika 27: Spreminjanje mikrostrukture jekla 50CrV4 pri normalnem ohlajanju	54

Slika 28: Spreminjanje mikrostrukture jekla 50CrV4 + 10 % pri normalnem ohlajanju	55
Slika 29: Primerjava gostote jekla 50CrV4 in jekla 50CrV4 + 10 %	56
Slika 30: Primerjava specifične toplote jekel 50CrV4 in 50CrV4 + 10 %	57
Slika 31: Primerjava toplotne prevodnosti med jekli 50CrV4 in 50CrV4 + 10 %	58
Slika 32: Primerjava linearnega raztezka med jekli 50CrV4 in 50CrV4 + 10 %	59
Slika 33: Primerjava 0,2 % nateznega preizkusa pri visoki temperaturi med jekli 50CrV4 in 50CrV4 + 10 %	60
Slika 34: Mikrostrukturne faze jekla 50CrV4 po kaljenju	61
Slika 35: Mikrostrukturne faze jekla 50CrV4 + 10 % po kaljenju	61
Slika 36: Primerjava gostote jekel 50CrV4 in 50CrV4 + 10 %	63
Slika 37: Primerjava toplotne prevodnosti med jekli 50CrV4 in 50CrV4 + 10 %	64
Slika 38: Primerjava specifične toplote po kaljenju med jekli 50CrV4 in 50CrV4 + 10 %	65
Slika 39: Diagram Jominyjevega preizkusa kaljivosti za jeklo 50CrV4.....	66
Slika 40: Diagram Jominyjevega preizkusa kaljivosti za jeklo 50CrV4 + 10 %	66
Slika 41: Primerjava trdote po kaljenju med jekli 50CrV4 in 50CrV4 + 10 %	67
Slika 42: Primerjave natezne trdnosti jekel 50CrV4 in 50CrV4 + 10 %	68
Slika 43: Primerjava 0,2 % nateznega preizkusa med jekli 50CrV4 in 50CrV4 + 10 %	69
Slika 44: Diagram Jominyjevega preizkusa kaljivosti za jeklo 50CrV4.....	71
Slika 45: Diagram Jominyjevega preizkusa kaljivosti za jeklo 50CrV4-V	71
Slika 46: Primerjava trdote po kaljenju jekel 50CrV4 in 50CrV4-V	72
Slika 47: Primerjava natezne trdnosti pri jeklih 50CrV4 in 50CrV4-V po kaljenju ..	73
Slika 48: Primerjava 0,2 % nateznega preizkusa pri jeklih 50CrV4 in 50CrV4-V	74
Slika 49: Diagram Jominyjevega preizkusa kaljivosti za jeklo 50CrV4-Cr	75
Slika 50: Primerjava trdote med jekli 50CrV4 in 50CrV4-Cr po kaljenju	76
Slika 51: Primerjava natezne trdnosti jekel 50CrV4 in 50CrV4-Cr po kaljenju.....	77
Slika 52: Primerjava 0,2 % nateznega preizkusa med jekli 50CrV4 in 50CrV4-Cr po kaljenju	78
Slika 53: Diagram Jominyjevega preizkusa kaljivosti za jeklo 50CrV4-Mn.....	79
Slika 54: Primerjava trdote jekel 50CrV4 in 50CrV4-Mn po kaljenju	80
Slika 55: Primerjava natezne trdnosti jekel 50CrV4 in 50CrV4-Mn po kaljenju	81

Slika 56: Primerjava 0,2 % nateznega preizkusa med jekli 50CrV4 in 50CrV4-Mn po kaljenju	82
Slika 57: Diagram Jominyjevega preizkusa kaljivosti za jeklo 50CrV4-Ni	83
Slika 58: Primerjava trdote jekel 50CrV4 in 50CrV4-Ni po kaljenju.....	84
Slika 59: Primerjava natezne trdnosti med jekli 50CrV4 in 50CrV4-Ni po kaljenju	85
Slika 60: Primerjava 0,2 % nateznega preizkusa med jekli 50CrV4 in 50CrV4-Ni po kaljenju	86

1 UVOD

Jeklo je v človeški zgodovini pomenilo preživetje in razvoj človeške vrste. Iz enostavnih jeklenih predmetov je človek izumil zahtevne sisteme in mehanizme, s katerimi si lajša življenje. Ta proces je trajal tisočletja in se še nadaljuje. Človek je s svojim razumom in inovativnostjo skušal izboljšati splošne fizikalne in kemijske lastnosti jekel, zato je k surovemu železu dodal še druge kovine (Cr – krom, Zn – cink itd.), ki jim pravimo legirni elementi. Z dodajanjem legirnih elementov v različnih količinah in kombinacijah dobimo jekla z različnimi lastnostmi, ki jih lahko uporabljamo v različne namene. Obstajajo tudi razni postopki (valjanje, mečkanje, kaljenje idr.) za mehansko spreminjanje lastnosti jekel.

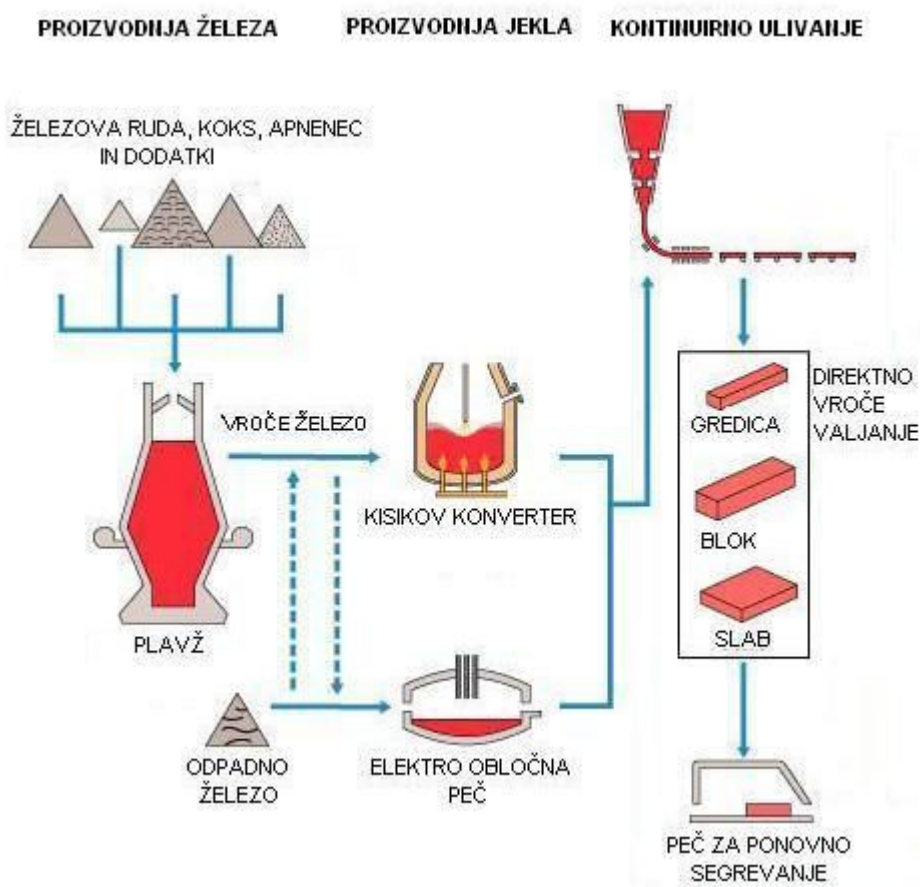
Nenehno pa se išče razno razne kombinacije postopkov in dodanih elementov za pridobitev še več različnih vrst jekel, ki bi se jih lahko uporabljalo v še obširnejšem obsegu. Za ta namen je priskočila na pomoč sodobna tehnologija z zahtevnimi računalniškimi programi, ki pomagajo k iskanju novih rešitev in postopkov na osnovi simulacij. Na ta način lahko simuliramo litje in na bolj ekonomičen in hiter način pridemo do želenih ugotovitev, ki bi jih drugače lahko dognali samo z dolgotrajnimi dragimi in zapletenimi eksperimenti.

V diplomskem delu so opisani postopki predelave, klasifikacija in lastnosti jekel ter postopki preizkušanja lastnosti jekel. Glavni cilj je analiza snovnih lastnosti jekel 50CrV4 in 51CrMoV4/52CrMoV4, kot so trdota, natezna trdnost, ipd., v odvisnosti od variacij sestave s pomočjo računalniškega programa JMatPro. Pridobljeni podatki, so predstavljeni primerjalno v obliki grafov. Nekatere grafe je izrisal sam program JMatPro (mikrostrukturalne faze, Jominyjeva trdota), ostale pa program za oblikovanje grafov Origin. Omenjeni podatki bodo v pomoč podjetju Štore Steel d.o.o. Štore, Slovenija, kjer omenjeni jekli masovno proizvajajo.

Življenja brez jekla si ne moremo predstavljati, saj je ena ključnih sestavin skoraj vseh naših izumov. Zaradi svojih lastnosti (vzdržljivosti, teže, žilavosti ipd.) je skrajno uporabno in funkcionalno.

2 PROIZVODNJA JEKLA

Proizvodnja jekla (žilavenje železa) obsega več procesov, ki se delijo na to, katero kakovost hočemo doseči. Zato je potrebno v naprej vedeti namembnost jekla, da temu primerno izberemo način pridelave jekla. Vsekakor pa se proizvodnja jekla začne pri pridelavi železa, iz katerega naredimo jeklo. Proces spremembe železa v jeklo imenujemo žilavenje železa. Obstaja več postopkov žilavenja, odvisno katero jeklo želimo proizvesti. Osnoven postopek proizvodnje jekla je razviden na sliki 1.



Slika 1: Postopek proizvodnje jekla

2.1 Proizvodnja jekla v Sloveniji

Proizvodnja jekla ima v Sloveniji skoraj 400 letno staro in bogato tradicijo, tako so leta 2005 proizvajalci železa, jekla in ferozlitin imeli na razpolago več kot 736 000

ton jeklenih odpadkov in odpadkov iz železove litine. Od tega so jih 553 000 ton kupili, 120 000 ton odpadkov pa je izviralo iz lastnih obratov (lastni odpadki). Poleg tega so imeli na razpolago okoli 63 000 ton zalog odpadkov. Skupno so predelali dobrih 90 % vseh razpoložljivih odpadkov.

Pri proizvodnji železa in jekla so porabili več kot 700 000 MWh električne energije. Od tega so največ (čez 50 %) elektrike porabili v elektro jeklarnah in pri kontinuirnem ulivanju. V letu 2005 so naložbe v industrijo železa in jekla znašale skoraj 35,5 mio €; največji del naložb (skoraj 60 %) je bilo realiziranih v valjarnah. Več kot 5 mio € naložb je bilo namenjenih za zmanjšanje onesnaženja, kar je bistveno več kot leta pred tem. Leta 2005 je bila maksimalna možna proizvodna (kapaciteta) surovega jekla 683 000 ton, kapacitete toplih valjarn so znašale 520 000 ton, od tega so kapacitete namenjene proizvodnji ploščatih izdelkov predstavljale 80 %, za proizvodnjo dolgih izdelkov je bilo namenjenih 20 % kapacitet

2.2 Proizvodnja železa

Proizvodnja železa se začne v rudniku z izkopavanjem železove rude. Rude se med seboj razlikujejo. Rude, ki se jih še splača uporabljati, vsebujejo od 35 do 70 % železa. Najpomembnejše rude so:

- magnetit (Fe_3O_4), ki je oksidna ruda in vsebuje največ železa,
- hematit (Fe_2O_3), ki je prav tako oksidna z velikim odstotkom železa,
- limonit (Fe_2O_3 in H_2O), ki je hidrat železovega oksida z različno vsebnostjo vezane vode in vsebuje do 54 % železa,
- siderit (FeCO_3), ki je karbonatna ruda in vsebuje od 36 do 42 % železa. Pred predelavo v plavžu ga je potrebno z žarjenjem prevesti na oksidno osnovo (Aberšek, 1995).

Pridobivanju železa iz rude pravimo redukcija. Pred redukcijo moramo večino rud pripraviti. V rudi iz rudnika je primešana jalovina. Čiščenje jalovine iz rude imenujemo bogatenje.

Poleg rude dajemo v plavž še dodatke (npr. apno) in koks. Dodatki so lahko kisli ali bazični. Večinoma so bazični, ker v jalovini in pepelu koksa prevladujejo kisle

sestavine, zbiramo jih glede na primesi v rudi. Z ustreznim razmerjem rud in primesi lahko količino dodatkov zmanjšamo. Dodatki služijo temu, da spremenijo sestavo žlindre. Če ne dodamo dodatkov, je žindra enaka jalovini, zato dodamo dodatke, da dobimo žindro ustrezne sestave (Pelhan, 1980).

Koks v plavžu opravlja tri naloge:

- kot gorivo proizvaja toploto, ki je potrebna za reakcije v plavžu in taljenje vsipa,
- s kisikom iz zraka, ki ga vpihavamo v plavž se veže v CO_2 , deluje kot reducent oksidne rude: veže kisik iz rude,
- tretja naloga je ogljičenje taline, grodlju daje od 3,5 do 4,2 % ogljika.

Z rudo, dodatki in koksom polnimo plavž. Material vsipamo na vrhu plavža, kjer dvojni zaporni sistem prepreči uhajanje plavžnega plina med polnjenjem. Za zgorevanje koksa potrebujemo še kisik, ki ga zato v spodnjem delu plavža vpihavamo kot ogret zrak.

Plavž deluje protitočno. Ruda, dodatki in koks potujejo od žrela proti talilniku (z vrha proti tlom). Ko preidejo pas sušenja (zgornji del), se začne posredna redukcija (reducent je CO), nato v jašku ogljičenje in direktna redukcija (reducent je trdni ogljik). V talilniku se zbira grodelj, nad njim pa plast žlindre. Zrak (plini) potuje od sedla proti vrhu žrela plavža. Pri tem se kisik veže v CO in indirektno reducira rudo. Približno tretjina plavžnega plina je sestavljena iz gorljivih plinov CO in H_2 . Zaradi tega uporabljamo plavžni plin za segrevanje predgrevalnikov zraka – kavperjev. Zrak ogrejemo od 800 do 1000 °C, tako prihranimo na vsakih 100 °C od 4 do 5 % koksa. Pred pihalicami plavža dosežemo temperaturo nad 1600 °C.

Zrak ogrejemo tako, da plavžni plin na grobo prečistimo trdih delcev, nato pa ga dovajamo v kavperjev stolp, kjer zgori in s tem greje opečno satovje. Ko je satovje dovolj razbeljeno, se smer obrne in skozi satovje se poganja zrak, ki se pregreje. Ta pregreti zrak vpihavamo v plavž. Za normalno delovanje plavža je potrebno imeti najmanj tri kavperjeve stolpe. Dva stolpa se izmenjujeta, ko enega grejemo, drugega hladimo, tako da grejemo zrak, tretjega pa se uporablja za rezervo, za morebitna vzdrževalna dela in čiščenje (Aberšek, 1995).

Elektro plavž je podoben navadnemu plavžu, le da dodatek goriva služi samo za redukcijo, saj potrebno toploto proizvajajo električni tok. Količina plina je zaradi tega manjša (ni potreben jašek peči), zmanjša se delež indirektno redukcije. Glavne reakcije potekajo v spodnjem delu peči, kjer električni tok tali vložek. Prednost tovrstne peči je, da lahko uporabljamo drobno kosovno rudo, ki jo v plavžu ne bi mogli uporabiti. Za redukcijo lahko uporabljamo tudi manjvredno blago.

Iz plavža dobimo:

- plavžni plin, sestavljen iz gorljivih (CO , H_2) in negorljivih (CO_2 , N_2),
- kislo ali bazično žlindro, ki jo zaradi velikih količin (0,4 do 0,7 tone žlindre na tono grodlja) predelamo v cement, gramoze različnih zrnatosti, lite tlakovce, porozne zidake in žlindro,
- bel ali sivi grodelj: beli grodelj vsebuje več mangana, sivi pa več silicija, zato se v sivem grodlju ogljik izloča v grafitne ploščice, ki dajejo prelomu temno sivo barvo. Grodelj vsebuje poleg C, Mn in Si še preveč fosforja (P) in žvepla (S), zato v naslednjem postopku predelave izločimo odvečne primesi (Aberšek, 1995).

2.3 Proizvodnja jekla – žilavenje železa

Proizvajanje jekla imenujemo tudi žilavenje železa, ker je jeklo prečiščeno železo z dodanim ogljikom ali kakšnim drugim legirnim elementom. Beli grodelj žilavimo v raztaljenem stanju tako, da C, Mn, Si, P in S spremenimo v takšne spojine, ki bodo kot žlindra ali plin splavale iz taline.

Načine žilavenja razdelimo na:

- ognjiščno žilavenje (martinovka, elektro peč),
- zračno žilavenje (bessemerjev in thomasov postopek – zastarelo),
- kisikovo žilavenje (kisikovi konverterji).

Nadaljnje ločimo bazični in kisli postopek. Pri bazičnem postopku imamo bazično izzidavo ter bazično žlindro, pri kislem postopku pa sta izzidava in žlindra kisli. Na kakšen način pridobivamo jeklo, je odvisno od surovin in značaja livarne. V naših

razmerah uporabljamo za večje količine litine bazično obzidane martinovke in elektro peči, za manjše količine pa kislo obzidane konvertorje in indukcijske peči. Kislo obzidane peči zahtevajo posebno izbran vložek, ki ne vsebuje fosforja in žvepla, kar je zelo težko za velike količine. Zato večje količine talimo v bazično obzidanih pečeh, manjše količine, ki jih je lažje kontrolirati, pa v kislo obzidanih pečeh (Peljhan, 1980).

2.3.1 Procesi med žilavenjem

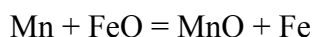
Pri temperaturah žilavenja se ogljik, silicij, mangan in fosfor oksidirajo. Količina in hitrost oksidacije je odvisna od osnovne oksidacijske tendence (afinitete), temperature in relativne količine elementa.

Proces žilavenja jekla delimo na štiri faze:

- taljenje,
- oksidacija,
- rafinacija,
- dezoksidacija.

Taljenje je proces, pri katerem vložek stalimo. Med taljenjem se delno oksidirajo železo, mangan, silicij in ogljik. Del železovih oksidov pride v peč že z vložkom. Ko nastane žlindra, poteka oksidacija z FeO, ki je v žlindri raztopljen.

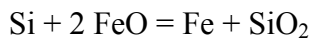
Tipične reakcije so: $\text{Si} + 2 \text{FeO} = \text{SiO}_2 + 2 \text{Fe}$



Med taljenjem se silicij in mangan prej oksidirata kot ogljik, tako da ostane ogljik v talini. Silicij oksidira že med taljenjem v bazičnem procesu. Neugoden SiO_2 oslabimo z dodatkom CaO.

Oksidacija in rafinacija potekata za vsak element drugače. Ogljik se veže s kisikom in tvori CO oziroma: $\text{C} + \text{FeO} = \text{CO} + \text{Fe}$. CO premešava kopel, pri čemer odstranjuje vodik, dušik ter oksidacijske produkte. Ogljik oksidira lažje, če je čim več C v talini, čim več FeO v žlindri in talini in pri čim višji temperaturi.

Silicij se delno oksidira že med taljenjem. Po razdelitvi se oksidacija nadaljuje:



Silicij lažje oksidira, če je silicija in FeO čim več v talini, in ob čim nižji temperaturi.

Mangan se podobno kot silicij delno oksidira že med taljenjem. Nato pa oksidacija poteka naprej po: $\text{Mn} + \text{FeO} = \text{MnO} + \text{Fe}$.

Mangan se porazdeli med žlindro in kovino. Količina mangana v kovini je odvisna od mangana v žlindri, oksidacijskih karakteristik žlindre, količin in sestave žlindre ter temperature.

Fosfor odstranimo z baznimi oksidi, ki tvorijo bazično žlindro. Poteka sledeča reakcija: $2 \text{P} + 5 \text{FeO} = \text{P}_2\text{O}_5 + 5 \text{Fe}$.

FeO oksidira fosfor v talini. S CaO se tvorijo kalcijevi fosfati: $\text{P}_2\text{O}_5 + 3 \text{CaO} = \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 + 5\text{Fe}$.

Fosfor se odstrani lažje, če je čim več FeO in CaO in čim manj SiO₂ v žlindri ter pri čim nižji temperaturi.

Žveplo odstranimo, če je žlindra bazična. Ugodno je odstranjevanje z redukcijsko žlindro (v elektro peči), ko poteka reakcija: $\text{FeS} + \text{C} + \text{Ca} = \text{CO} + \text{Fe} + \text{CaS}$.

Razžveplanje je boljše, če je čim več CaO in čim manj FeO v žlindri, čim več Mn v kopeli in ob čim višji temperaturi.

Kisik je reagent med žilavenjem. Razdeljen je med žlindro in kovino. Pri ognjiščnem žilavenju se kisik v žlindri stalno nadomešča iz zgorevalnih plinov ali iz dodane rude.

Dezoksidacija je odstranjevanje raztopljenega kisika iz taline. Po rafinaciji je v kovini malo ogljika in veliko kisika.

Kot dezoksidante uporabljamo mangan, silicij in aluminij. Uspešnost dezoksidacije je odvisna od koncentracije kisika, ki ostane v talini pri gotovi količini dezoksidanta. Najmočnejši dezoksidant je aluminij, sledita mu silicij in mangan. Navadno

dezoksidiramo s kombiniranimi dezoksidanti (Mn – Si oz. Mn – Al), pri čemer se proizvodi dezoksidacije lažje odstranijo (Peljhan, 1980).

Legiranje je proces, pri katerem dodajamo jeklu željene elemente (lahko so kovine ali nekovine), ki spreminjajo lastnosti jekla. Lahko dodamo enega ali več legirnih elementov. Najbolj pogosto uporabljeni elementi so:

Ogljik vpliva predvsem na trdnost in trdoto. Čim več je ogljika v jekleni litini, tem bolj je trdna, je pa zaradi tega manj raztezna.

Mangan povečuje trdnost, zmanjšuje pa razteznost. Povečuje žilavost ter odpornost proti obrabi in odpornost proti višjim temperaturam.

Silicij povečuje predvsem natezno trdnost, slabša pa razteznost. Povečuje tudi odpornost proti višjim temperaturam.

Nikelj izboljšuje mehanske lastnosti, povečuje odpornost proti koroziji, višjim temperaturam in obrabi. Vpliva lahko tudi na strukturo litine.

Krom, kot nikelj povečuje trdnost, odpornost proti koroziji, obrabi in višjim temperaturam. Zmanjšuje pa žilavost jeklene litine.

Molibden povečuje natezno trdnost, žilavost ter odpornost proti obrabi in oksidaciji v ognju ter odpornost proti pregrevanju.

Vanadij daje litini večjo natezno trdnost ter povečuje odpornost proti obrabi in višjim temperaturam.

Titan povečuje trdnost do 1,5 %. Pri večjih količinah pa se trdnost začne zopet manjšati.

Baker povečuje trdnost in žilavost, zmanjšuje pa odpornost proti ognju.

Fosfor povzroča v jeklu krhkost (predvsem v hladnem stanju).

Žveplo povzroča krhkost v vročem stanju, vendar z dodatkom mangana lahko ta vpliv delno oslabimo (Leskovar, 1978).

2.3.2 Žilavenje v Martinovki

Ognjiščno žilavenje v Siemens–Martinovi peči je dolgotrajno taljenje trdega vložka z uporabo dodatnega kuriva. Martinovko lahko polnimo s starim železom in grodljem v trdnem stanju, lahko v staljenem stanju in v kombinaciji.

V martinovki dosežemo temperaturo od 1600 do 1700 °C. To dosežemo tako, da kurilne pline ogrejemo pred vstopom v peč. Pri martinovki so izzidani hrami (regeneratorji) pod pečjo, v katerih je izzidano satovje iz opeke. Najprej vodimo plin skozi plinsko komoro in zrak skozi zračno komoro na eni strani peči. Ob prehodu mimo razbeljene opeke se zrak in plin ogrejeta. Iz komor ju vodimo ob strani peči navzgor v peč. Mesto v peči, kjer se kanala združita in se zrak in plin zmešata ter zgorita, imenujemo gorilnik. Dovodna kanala sta ob vhodu v peč nagnjena navzdol, da plamen gorilnika bije čim bolj ob vložek in prenaša nanj čim več toplote.

Na drugi strani ognjišča tečejo vroči dimni plini po kanalih skozi drugi plinski in drugi zračni hram, kjer ogrevajo opečno satovje. Po približno $\frac{1}{4}$ - $\frac{1}{2}$ ure obrnemo smer. Hladilne kurilne pline (zrak in plin) vodimo skozi razbeljena hrama, z vročim dimnim plinom pa ogrevamo prvi hram, ki smo ga prej ohladili.

Ognjišče je plitvo, tako da lahko na najnižji točki dno prebijemo in izpraznimo peč v pripravljeno livno ponvico. Na prednji strani pa ima več vrat za polnjenje peči. Manjše peči držijo le okrog 50 ton, velike pa od 180 do 300 ton jekla ali več.

Procese žilavenja, ki potekajo v martinovki (ognjičevo žilavenje), smo obdelali že v prejšnji točki. Med rafinacijo in dezoksidacijo pa poteka legiranje.

2.3.3 Žilavenje v elektroobločnih pečeh

Elektro obločne peči uspešno nadomeščajo martinovke, zlasti kjer ni na razpolago dovolj surovega železa. V martinovki lahko proces žilavenja poteka kontinuirano, v elektro obločnih pečeh pa potekajo krajše žilavilne faze, ki po določenem času ponehajo.

Taljenje v elektro peči je v primerjavi z martinovko hitrejše, kar omogoča uporabo večje količine jeklenih odpadkov (lahko tudi brez grodlja). Med oksidacijskim

obdobjem pride do oksidacije ogljika, silicija, mangana in fosforja. Vrstni red reakcij je odvisen od temperature v peči. Med oksidacijo uporabljamo žlindro bogato na FeO, ki jo imenujemo oksidacijska, črna ali fosforna žlindra. V teku rafinacije odstranjujemo v prvi vrsti žveplo iz taline ter vključke, ki so nastali v teku oksidacije in rafinacije.

Osnovna reakcija, ki poteka med rafinacijo je: $\text{FeS} + \text{CaO} = \text{FeO} + \text{CaS}$. Razžveplanje pospešimo z dezoksidacijo oziroma karbidno žlindro: $3\text{FeS} + 2\text{CaO} + \text{CaC}_2 = 3\text{Fe} + 3\text{CaS} + 2\text{CO}$. Karbidna žlindra je močno bazična.

Pri žilavenju v elektro peči lahko delamo z eno ali dvema žlindrama, kar omogoča, da izdelamo kvalitetno jeklo. Po končani oksidaciji in rafinaciji litino dezoksidiramo z dodatkom silicija in mangana oziroma aluminija.

2.3.4 Žilavenje v konvertorju

Konvertor je naprava v kateri žilavimo jeklo z dovajanjem kisika z vrha skozi kisikovo kopje. To so posode iz močne pločevine, znotraj obzidane z ognjestalno opeko. Držijo vložek od 15 do 60 t jekla. V konvertor damo že staljeno jeklo, kjer z vpihovanjem čistega kisika poteka oksidacija. Energija, ki je sproščena pri oksidaciji, skrbi, da se vložek ne strdi (ohladi), da ni potrebno dodajati energije. Potek oksidacije opazujemo po obliki in barvi plamena. Ko začnemo pihati in ko zgorevata silicij in mangan, se pojavi kratek plamen z večjo količino isker. Po približno 5 minutah se povečata dolžina in svetlost plamena zaradi zgorevanja ogljika. Na koncu se pojavi rjav dim, ki je značilen za oksidacijo železa.

Oksidacija elementov poteka delno v sami talini, delno pa dudi na meji taline in žlindre. Na začetku je velik presežek kisika v talini in žlindri, kar zelo ugodno vpliva na hitro oksidacijo elementov. Hitrost lahko reguliramo z odmikanjem kopja in manjšim pritiskom kisika. S počasnejšo rotacijo konvertorja se povečuje aktivnost žlindre, kar je ugodnejše za oksidacijo fosforja.

Pri vpihovanju kisika v talino oksidira najprej železo. Njegovi oksidi se hitro porazdelijo po talini, kjer oksidirajo spremljajoče elemente, predvsem silicij, ki ga je manj zaradi dodanega starega jekla in se oksidira v prvih minutah. Sledi oksidacija

mangana. Zaradi zvišanja temperature taline pride do ponovne redukcije mangana. V teku nadaljnega žilavenja se oksidacija mangana nadaljuje. Oksidacija ogljika se začne že v prvih minutah. Tudi oksidacija fosforja se začne že v prvih minutah pihanja, kjer doseže svoj maksimum. V teku žilavenja v konvertorju se oksidira ogljik, silicij, mangan in fosfor, žveplo pa se veže s CaO v CaS. Temperatura se zaradi oksidacije elementov močno dvigne. Visoka temperatura omogoča žilavenje tekočega grodlja in jeklenih odpadkov, ki jih dodajamo za hlajenje kopeli.

V konvertor z določeno količino starega železa, tekočega grodlja in 3–8 % apna, spustimo kisikovo kopje proti površini vložka na oddaljenost 60–100 cm. Močno vodno hlajeno kopje z bakreno šobo s 3–6 odprtinami, skozi katere pihamo kisik pri pritisku 9–10 bar. Za hlajenje uporabimo rudo ali železo. Povprečni skupni dodatek rude znaša 5 % ali starega železa 12–20 %. Izdelava taline traja pri teži vložka do 40 t 33–35 min in se podaljša pri 2000 tonskem konvertorju do 90 min. Pri tem nastane približno od 120 do 160 kg žlindre na tono jekla (Pelhan, 1980).

3 RAZDELITEV JEKEL

Jekla razdelimo po različnih parametrih in lastnostih. Tako poznamo glavno delitev po kemični sestavi (legirana in nelegirana) in po namenu uporabe. Obstajajo še drugi kriteriji razdelitve jekel (po mikrostrukturi, po stanju izdelave), vendar najpomembnejše razdelitve našete in prikazane v nadaljevanju.

3.1 Razdelitev po kemični sestavi

Glede na razdelitev po kemični sestavi poznamo dve vrsti jekel: ogljikova (nelegirana) in legirana jekla.

3.1.1 Ogljikova (nelegirana) jekla

Ogljikova jekla vsebujejo največ C ter določeno količino različnih spremljevalcev: Si, Mn, P in S, ki ne smejo prekoračiti določene vsebnosti, sicer bistveno spremenijo lastnosti jekla. Zgornje dopustne meje za posamezne elemente so določene v tabeli 1.

Ogljikova jekla delimo še na:

1. **Osnovna nelegirana (maloogljična) jekla** vsebujejo do 0,30 % C in imajo predpisano min. natezno trdnost, min. napetost tlačanja, min. raztezek, min. udarno žilavost pri 20 % C. Nimajo pa predpisanih zahtev za hladno preoblikovanje. Največkrat se jih valja v ploščate proizvode (pločevinke) v hladnem stanju. Uporablja se jih tudi za avtomobilske karoserije, nevarjene cevi in kotle.
2. **Kakovostna nelegirna (srednjeogljična) jekla** vsebujejo od 0,3 do 0,6 % C in od 0,6 do 1,65 % Mn. Imajo predpisane višje mehanske lastnosti, vendar so brez predpisanih lastnosti glede toplotne obdelave in čistosti glede nekovinskih vključkov. Uporabljamo jih za poboljšane dele (ojnice, gredi, osi ipd.), za železniške tirnice, kolesa in osi tirničnih vozil.
3. **Specialna nelegirana (mnogoogljična) jekla** vsebujejo od 0,6 do 1,0 % C in od 0,3 do 0,9 % Mn. So namenjena predvsem za toplotno obdelavo in imajo predpisano strožjo kemijsko sestavo ter mehanske lastnosti. Včasih imajo

predpisane zahteve za hladno preoblikovanje in varivost. Uporabljamo jih za izdelavo vzmeti in žice z visoko natezno trdnostjo.

Osnovna in kakovostna nelegirana ogljikova jekla predstavljajo približno 80 % svetovne proizvodnje in jih uporabljamo za gradnjo strojev, jeklenih konstrukciji (profili), kot gradbeno jeklo, pločevino, ladijsko pločevino, cevovode, verige ipd. (Kovač, 1999)

Tabela 1: Mejne vrednosti deležev legirnih elementov za razlikovanje legiranih in nelegiranih jekel

Simbol	Element	Mejna vrednost v masnih %
Al	aluminij	0,10
B	bor	0,0008
Bi	bizmut	0,1
Co	kobalt	0,10
Cr	krom	0,030
Cu	baker	0,40
La,...,Yb	lantanoidi (vsak)	0,05
Mn	mangan	1,65
Mo	molibden	0,08
Nb	niobi	0,06
Ni	nikelj	0,30
Pb	svinec	0,40
Se	selen	0,10
Si	silicij	0,50
Te	telur	0,10
Ti	titan	0,05
V	vanadij	0,10
W	volfram	0,10
Zr	cirkonij	0,05
	drugi razen ogljika, fosforja, žvepla in dušika posamično	0,05

(Vir: Leskovar, 1986)

3.1.2 Legirana jekla

Legirana jekla so tista, ki vsebujejo $>0,5\%$ Si in $>0,8\%$ Mn in/ali še druge namerno dodane elemente. Malolegirana jekla vsebujejo do 5% zlitinskih elementov, visokolegirana pa več kot 5% . V tabeli 2 so našteje mejne vrednosti deležev elementov za razlikovanje kakovostnih in specialnih legiranih jekel.

Tako legirana jekla delimo na:

1. Kakovostna legirana jekla, ki jih navadno uporabljamo za podobne namene kot kakovostna nelegirana jekla in na splošno niso namenjena za toplotno obdelavo. Ta jekla so:

- varivna drobnozrnata,
- jekla za elektro pločevino (imajo določene predpise glede magnetizma),
- legirana jekla za železniške tračnice in rudniške konstrukcije,
- jekla za hladno preoblikovanje, ki imajo dodane elemente za doseganje fine mikrostrukture (B – bor, Nb – niobij, Ti – titan, V – vanadij, Zr – cirkonij),
- legirana jekla, pri katerih je C edini pomembni legirni element.

2. Specialna legirana jekla, ki imajo ozko določeno kemijsko sestavo za doseganje lastnosti v tolerančnih območjih. Glede na sestavo so specialna legirana jekla razdeljena na:

- nerjavna jekla,
- hitrorezna jekla,
- druga legirna jekla.

Tabela 2: Mejne vrednosti deležev elementov za razlikovanje kakovostnih in specialnih legirnih jekel

Simbol	Element	Mejna količina v masnih %
Cr	krom	0,50
Cu	baker	0,50
La,...,Yb	lantanoidi (vsak)	0,06
Mn	mangan	1,80
Mo	molibden	0,10
Nb	niobij	0,08
Ni	nikelj	0,50
Ti	titan	0,12
V	vanadij	0,12
Zr	cirkonij	0,12
	drugi neomenjeni elementi (vsak)	(glej preglednico mejnih vrednosti deležev legirnih elementov za razlikovanje legirnih in nelegirnih jekel)

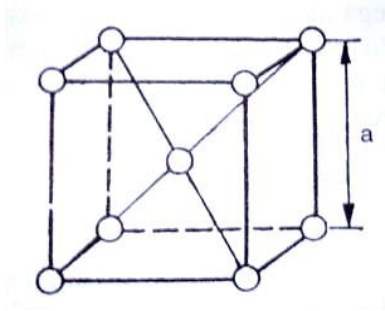
(Vir: Župančič, 1998)

3.2 Delitev jekel glede na mikrostrukturo

Po delitvi glede na mikrostrukturo sta dve najznačilnejši skupini jekel: feritna jekla in avstenitna jekla. Pri ohlajanju pa nastanejo še druge strukture, kot so martenzit, cementit, perlit in bainit.

3.2.1 Feritna jekla

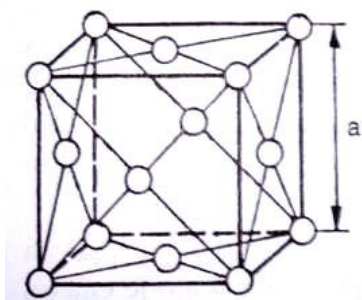
Feritna jekla so tista jekla, ki imajo feritno (prostorsko centrirano kubično) strukturo pri vseh temperaturah do tališča. Model take mikrostrukture je prikazan na sliki 2. Alfageni elementi (ožijo avstenitno področje) so Si, Cr, W, Mo, Ti, V, Al in P. Feritna jekla so feromagnetna in odporna proti koroziji. Imajo grobozrnato mikrostrukturo. Značilno feritno jeklo je transformatorska pločevina, ki vsebuje 0,05 % C in 3–4 % Si. Prekristalizacija feritnih jekel je možna samo s plastično deformacijo. To pomeni, da lastnosti spreminjamo samo z valjanjem, gnetenjem itd.



Slika 2: Prostorsko kubična mikrostruktura - ferit (Vodopivec, 2002)

3.2.2 Avstenitna jekla

Avstenitna jekla (ploskovno kubična porazdelitev atomov v kristalu – razvidno na sliki 3) imajo visoko stopnjo utrjevanja s plastično deformacijo v hladnem stanju to je deformacijsko utrjanje. K tem jeklom spada tudi manganovo trdo jeklo, ki je po plastični deformaciji v hladnem izredno trdo in ga uporabljamo pri drobilnikih in gradbenih strojih (manganovo trdo jeklo vsebuje do 12 % Mn). Čista nikljeva jekla se zelo redko uporabljajo. To so jekla s posebno toplotno razteznostjo in so pomembna pri gradnji instrumentov. Do 20 % Ni se razteznost večja in od 20 do 30 % se razteznost manjša. Pri 36 % praktično ni več toplotnih raztezkov. Taka jekla so znana pod imenom invar jekla.



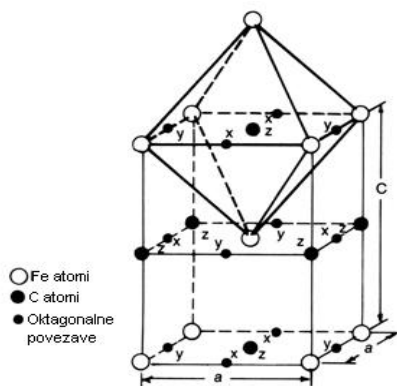
Slika 3: Ploskovno kubična mikrostruktura - avstenit (Vodopivec, 2002)

Elementi, ki razširjajo gama-področje, so Mn, Ni, Co, C in Cu. Pri dodatku niklja se gama-področje močno razširi in pri določeni vsebnosti niklja je gama-Fe obstojno pri

sobni temperaturi (~30 % Ni). Takšna jekla so od sobne temperature do tališča v avstenitnem področju, od koder tudi dobijo ime (Kovač, 1999).

3.2.3 Martenzitno jeklo

Martenzitna (tetragonalno prostorsko centrirana – prikazana na sliki 4) struktura nastane iz avstenitne pri zelo hitri ohladitvi. Kristalna zgradba Martenzitna je zelo podobna kristalni zgradbi ferita (TCK), razlika je samo v tem, da je velikost roba celice v smeri z-osi večja kot v smeri x- in y-osi. To popačenje povzroči prisilno raztopljen ogljik, ki se prednostno razporedi v oktaedrske vrzeli na robovih, ki so vzporedni z-osi. Avstenit, ki je v jeklu pri sobni temperaturi, imenujemo **zadržani**. Pri tej transformaciji se namreč ne pretvori ves v avstenit. Za martenzit je značilna velika trdota, ki je sorazmerna deležu ogljika. Veliko trdoto martenzita v največji meri povzroča prisilno raztopljeni ogljik (utrjanje trdne raztopine, raztopinsko utrjanje).



Slika 4: Tetragonalno prostorsko centrirana mikrostruktura - martenzit. (Vodopivec, 2002)

3.2.4 Cementit

To je stehiometrična vmesna spojina med železom in ogljikom. To pomeni, da je razmerje med številom atomov železa in ogljika natančno določeno ($\text{Fe} : \text{C} = 3 : 1$). Cementit se tali enako kot čisti element: pri konstantni temperaturi. Sestava taline, ki pri tem nastane, pa je enaka sestavi cementita. Njegovo tališče je pri $1260\text{ }^{\circ}\text{C}$ in je zelo trd. Ločimo primarni, sekundarni in terciarni cementit. Primarni cementit v faznem diagramu Fe-Fe₃C se neposredno izloča iz taline kot primarna faza v

koncentracijskem območju med 4,31 in 6,69 % C oziroma v temperaturnem območju med 1260 in 1147 °C. Sekundarni cementit se izloča iz avstenita med 0,77 in 2,14 % C med 1147 °C in 727 °C. Navadno se izloča po kristalnih mejah, kar bistveno zmanjša žilavost jekel. Terciarni cementit se izloča iz ferita med 0 in 0,022 % C ter 727 °C in 0 °C.

3.2.5 Perlit

Perlit je mikrostrukturalna sestavina, ki nastane pri eutektoidni reakciji (*to je reakcija, ki poteka v trdnem stanju. Ena trdna faza razpade v dve drugi različni trdni fazi. V binarnem sistemu poteka ta reakcija pri konstantni temperaturi in sestavi vseh faz*) v faznem diagramu Fe-Fe₃C in številnih jeklih. Sestavljen je iz ferita in cementita. Pri normalnem ohlajanju nastane lamelni perlit, pri zelo počasnem ohlajanju ali pri žarjenju lamelnega perlita pa dobimo kroglasti perlit ali sferoidit.

Eutektoidna točka v faznem diagramu Fe-Fe₃C je pri 0,77 % C in 727 °C. Pri eutektoidni reakciji avstenit sočasno razpade v ferit in cementit. Medlamelna razdalja med lamelami ferita se zmanjšuje z nižanjem temperature, pri kateri poteka razpad. Hkrati se s tem povečuje trdota perlita.

Če jeklo hitro ohladimo, lahko preprečimo nastanek perlita. V vmesnem območju nastane iz avstenita bainit, pri ohlajanju z nadkritično hitrostjo pa martenzit.

3.2.6 Bainit

Bainit je dvofazna mikrostrukturalna sestavina, ki nastane v jeklih iz avstenita pri izotermnem žarjenju ali ohlajanju s primerno ohlajevalno hitrostjo.

Ločimo:

- zgornji ali peresast bainit, ki je sestavljen iz ferita in majhnih ploščic cementita in
- spodnji ali igličast bainit, ki je sestavljen iz iglic ferita in v feritu izločenih drobnih delčkov epsilon karbida.

Zgornji bainit nastane pri višjih temperaturah ter ima manjšo trdoto kot spodnji bainit.

3.3 Delitev jekel po namenu uporabe

3.3.1 Konstruktivna jekla

Po delitvi jekel glede na namen uporabe (konstruktivna in orodna) se konstruktivna jekla največ uporabljajo.

Najpomembnejša so:

1. **Jekla za oblikovanje v hladnem** se preoblikuje z mehanskimi stroji. Med tem procesom ohranjajo celovitost (integriteto) do končne želene oblike. Zaradi zelo različnih oblik izdelkov ima neko jeklo lahko dobro preoblikovalnost za oblikovanje v določeno obliko, toda slabo za oblikovanje v neko drugo obliko. Napetost tečenja je indikator za oceno preoblikovalnosti in hkrati trdnosti po preoblikovanju.
2. **Jekla za armiranje betona** so ponavadi okrogle oblike 5–40 mm z natezno trdnostjo R_m do 500 MPa. Taka jekla so naravno trda jekla z večjim deležem C in dodatkom Mn in Si v vročem valjanem stanju. Adhezijo med jeklom in betonom povečamo z narebričenjem. Za prednapeti beton uporabljamo: naravno trda (vroče valjana jekla z $R_m = 650–700$ MPa, pri premerih do 30 mm dosežemo do 1200 MPa), malolegirana jekla v poboljšanem stanju, hladno vlečeno patentirano žico iz jekel z 0,6–0,8 % C in $R_m = 1400–1220$ MPa.
3. **Jekla za tlačne namene** so nelegirana ali malolegirana jekla ki se jih uporablja od 500–600 °C. Odpornost proti staranju dosežemo z dodatkom Al.
4. **Jekla za ladijsko pločevino** morajo biti dobro variva in odporna proti krhkemu lomu. Natezna trdnost znaša 410–500 MPa.
5. **Jekla za elektropločevino** so silicijeva jekla. Zanje je značilna relativno visoka permeabilnost, visoka električna upornost in nizka izguba pri magnetenju oziroma razmagnetanju. Prva taka jekla so razvili okrog leta 1900 v Veliki Britaniji. Ta jekla vsebujejo 0,5–5 % Si in jih proizvajamo v obliki transformatorske pločevine.

6. Jekla z orientiranimi zrni vsebujejo 3,25 % Si in jih uporabljamo za prenose večjih moči pri transformatorjih in generatorjih.

7. Neorientirana jekla delimo na:

- jekla z 0,5–1,5 % Si, ki jih uporabljamo za rotorje in statorje motorjev in generatorjev manjših moči,
- jekla s srednjimi deleži silicija (2,5–3,5 % Si) uporabljamo za motorje, transformatorje in generatorje srednjih moči,
- jekla z visokimi deleži silicija (3,75–5 % Si) pa uporabljamo za motorje in generatorje z visokim izkoristkom ter pri komunikacijski opreми (Kovač, 1999).

3.4 Orodna jekla

Orodna jekla so namenska jekla za izdelavo orodij, kot so npr. rezilna orodja, kokile, utopi ipd. ter za izdelavo drugih izdelkov, kjer so predpisane posebno visoke zahteve. Jekla razlikujemo glede na dve glavni vrsti operacij:

- za preoblikovanje,
- za odrezovanje.

Z orodji za preoblikovanje delamo v hladnem in vročem. Osnovna lastnost, po kateri ocenjujemo orodna jekla, je trdota. S sestavo in toplotno obdelavo spreminjamo še druge lastnosti: žilavost, popuščeno obstojnost, korozijsko obstojnost, odpornost proti udarnim obremenitvam.

3.4.1 Ogljikova orodna jekla za delo v hladnem

Značilna lastnost teh jekel je trda in proti obrabi odporna površina ter mehko in žilavo jedro. Vsebujejo od 0,5 do 1,4 % ogljika. Jekla z manjšim odstotkom ogljika so bolj žilava in bolje prenašajo udarce, jekla z večjim odstotkom pa so trša in bolj odporna proti obrabi. Jedro orodja ostane žilavo le, če se orodje ne prekali. Zato imajo vsa plitvo kaljiva jekla omejeno vsebnost silicija in mangana.

3.4.2 Legirana orodna jekla za delo v hladnem

Legirni elementi povzročajo, da so jekla močno kaljiva in se prekalijo tudi pri večjih prerezih, celo v milejših kalilnih sredstvih (olje ali celo zrak) ter v splošnem ugodno vplivajo na žilavost jekel. Legirni elementi, ki tvorijo z ogljikom karbide, povečujejo odpornost proti obrabi in večajo rezalne sposobnosti orodij. Orodja za delo v hladnem imajo po navadi zelo komplicirane oblike. Kalimo že dokončno izdelana orodja, zato moramo upoštevati različne faktorje kaljenja. Kalilne razpoke ali izkrivljenja rada nastanejo tudi zaradi nepravilne konstrukcije orodja (ostri robovi, zareze). Upoštevati je potrebno tudi manjšo toplotno prevodnost legiranih jekel. Popuščati je treba pri nekoliko višjih temperaturah kakor pri ogljikovih jeklih, običajno nad 300 °C.

3.4.3 Legirana orodna jekla za delo v vročem

Jekla za delo v vročem so večinoma legirana in jih uporabljamo za orodja, ki se pri uporabi močnejše segrejejo. Značilnosti teh jekel so trdota in trdnost v vročem ter obrabna obstojnost, kar je povezano z veliko popustno obstojnostjo. Karbidotvorni elementi (volfram, molibden, vanadij, krom) omogočajo doseganje velike trdnosti, obstojnosti proti obrabi in popustno obstojnosti. Dodatek teh elementov zmanjšuje tudi popustno krhkost. To velja predvsem za molibden. Vsa jekla za delo v vročem imajo razmeroma majhen delež ogljika, kljub temu, pa ogljik v zvezi s tvorci karbidov, močno vpliva na obstojnost proti obrabi.

3.4.4 Hitrorezna orodna jekla

Pri odrezovanju z velikimi rezalnimi hitrostmi in velikem podajanju se rezila orodij močno segrejejo, zato morajo imeti veliko popustno obstojnost. Hitrorezna jekla so po svoji strukturi ledeburitna jekla, ki vsebujejo sekundarne in evtektične (ledeburitne) karbide. Zaradi prisotnosti ledeburitnih karbidov obstaja pri kaljenju nevarnost pregretja. Hitrorezna jekla uporabljamo za izdelavo rezalnih orodij za obdelavo pri velikih hitrostih rezanja. Od njih zahtevamo veliko trdoto in obstojnost proti obrabi v vročem stanju. Te lastnosti omogočajo dodatki, kot so krom, volfram, vanadij in kobalt v točno določenih medsebojnih razmerjih.

4 LASTNOSTI JEKEL

Lastnosti jekel se od vrste do vrste jekla razlikujejo. Vsako jeklo ima določene lastnosti, ki so zaželeno pri namenu uporabe jekla. Jeklo ima lastnosti: trdota, žilavost, odpornost na daljše obremenitve. Neugodna lastnost skoraj vsakega jekla pa je oksidacija oziroma rjavenje. Nekatera jekla imajo lastnost oksidacije »izločeno« in jim pravimo nerjavna jekla. Ta jekla imajo lastnost, da pod vplivi okolja ne oksidirajo.

4.1 Trdota

Trdota je odpornost določenega jekla (materiala) proti prodiranju tujega telesa v njegovo površino. Jekla imajo različne trdnosti, ki jih je potrebno ugotoviti. Ugotovimo jih s poskusi. Obstaja več poskusov za merjenje trdnosti, ki so jih razvili različni znanstveniki, po katerih so tudi ti poskusi dobili ime.

- 1. Merjenje trdote po Brinellu** je zapisano v standardu SIST EN 10003-1. Poteka tako, da kaljeno jekleno kroglico počasi vtiskamo v očiščeno ravno površino s polno obremenitvijo delovanja od 10 s (za trde materiale) do 180 s (za mehke materiale). Po odmaknitvi kroglice z mikroskopom merimo premer vtiska. Uporabljamo lahko kroglice premera 10,5 ali 2,5 mm. Lahko uporabljamo tudi različno velike sile in različne čase trajanja obremenitve. Do trdote 450 HB uporabljamo kaljeno kroglico (namesto HB se lahko uporabi oznaka HBS), do 650 HB uporabljamo kroglico iz karbidne trdnine (oznaka HBW), višje trdote pa moramo meriti z drugo metodo.
- 2. Merjenje trdote po Vickersu** dopušča merjenje trdot vseh materialov od mehkejših do trših. V površino materiala vtiskamo diamantno konico v obliki kvadratne piramide s kotom med stranicama 136° . Sila je lahko poljubna, odvisna je od trdote materialov, največkrat pa uporabljamo zaokrožene vrednosti, ki jih za prikaz uporabe sile dodamo k označbi trdote po Vickersu, h kateri dodamo tudi čas trajanja. Pri uporabljeni sili pod 1,96 N pravimo, da merimo mikrotrdoto. Po vtiskanju z mikroskopom izmerimo obe diagonalni vtiska in izračunamo srednjo vrednost. Debelina preizkušanca mora biti najmanj 1,5 d.

3. **Merjenje trdote po Knoopu** je podobno kot po Vickersu, le da oblika konice je drugačna, s koti $172^\circ 30'$ in 130° . Vtiski imajo dve diagonali, od katerih merimo samo daljšo, ker jo lažje merimo. Vtiski imajo v primerjavi z ostalimi načini merjenja manjšo globino tako, da lahko merimo mikrotrdoto tanjših plasti ali tankih folij.
4. **Merjenje trdote po Rockwellu** poteka tako, da v površino preizkušanca vtiskamo telo, ki je lahko diamantni stožec (s kotom 120° in polmerom 0,2 mm) ali jekleno kroglico s premerom 1,5875 mm ali 3,175 mm. Pri tej metodi ne merimo premera ampak globino vtiska v jeklo. Začetna sila F_0 nam služi za določitev izhodiščne lege za merjenje. Nato obremenimo še z glavno silo F_1 in se obe sili seštejeta $F = F_0 + F_1$. Čas delovanja sile je od 2 do 30 sekund. Po odstranitvi glavne sile izmerimo razliko globine ob še delujoči sili F_0 . Debelina preizkušanca mora biti najmanj osemkrat večja od globine vtiska.
5. **Merjenje trdote po Shoreju** je posebno, ker površine preizkušanca ne poškoduje. To je pomembno za že dokončane izdelke, ki jih ne smemo poškodovati. Postopek temelji na odboju padalnega telesa, ki ima diamantno odbojno ploskev. Merimo višino odboja padalnega telesa. Višina odboja je odvisna od mase in elastičnega modula preizkušanca. Ta metoda se uporablja pri masovni proizvodnji (kroglice za kroglične ležaje). Pretrdi materiali odskočijo previsoko, premehki pa prenizko.

4.2 Žilavost

Žilavi materiali so tisti, ki se pred poružitvijo (prelomom) močno plastično deformirajo. Drobnozrnata kovina ali zlitina je praviloma bolj žilava od grobozrnate. Tudi za ugotavljanje žilavosti so potrebni preizkusi. Žilavost merimo s količino vložnega dela – A za prelom materiala, torej v joulih – J .

1. **Udarni preizkus po Charpyju** temelji na udarcu po standardizirani dimenziji epruvete materiala z U ali V zarezo. Epruveta leži na dveh podporah in z nihajnim kladivom skušamo z enim udarcem prelomiti preizkušanca ali pa potisniti špranjo med podporama. **Normalni pogoji preizkušanja so:** udarna energija kladiva znaša 300 J; KU – udarna zarezna

žilavost pri zarezi v obliki črke U z globino 5 mm in radijem v globini zareze 1 mm; KV – udarna zarezna žilavost pri zarezi v obliki črke V z globino 2 mm in radijem v globini zareze 0,25 mm. Preizkus z ostrejšo zarezo daje selektivnejše rezultate, zato ga pogosto uporabljamo. Ta metoda se uporablja predvsem v Evropi.

- 2. Udarni preizkus po Izodu** se pretežno uporablja v Veliki Britaniji in ZDA. Tudi tukaj je preizkušaneč kvadratnega prereza s stranico 10 mm. Po dolžini ima na razdaljah po 28 mm tri zareze v obliki črke V z globino 2 mm in kotom vrha zareze 45°. Zareze so izdelane na treh različnih stranicah, kar nam omogoča merjenje udarne zrezne žilavosti v treh med sabo pravokotnih smereh.

Pri višjih temperaturah poteka lom kovinskih materialov z velikimi predhodnimi plastičnimi deformacijami. Za zlom potrebujemo velike energije, govorimo o žilavem lomu. Pri nižjih temperaturah poteka lom brez predhodnih plastičnih deformacij in takšen lom imenujemo krhki lom. Za zlom preizkušanca potrebujemo majhne energije, kovinski deli postanejo krhki.

Na žilavost kovinskih materialov močno vpliva sestava materiala. Žilavost jekla zmanjšujejo ogljik, fosfor, žveplo in dušik, povečujejo pa jo nikelj, molibden in vanadij.

4.3 Koroziija

Koroziija je vsekakor negativna lastnost jekla. Koroziija je razjedanje ali razkrajanje kovinskih gradiv in zlitin zaradi kemičnih in elektrokemičnih vplivov. Zaradi koroziije nastaja velika gospodarska škoda. Pri koroziiji, zaradi kemičnih vplivov, kovine na površini kemično reagirajo s kisikom, plini, kislinami ali bazami iz okolja. Na površini kovine se naredi plast različnih spojin. Na jeklu se pojavijo železovi oksidi ali rja. Če je zaščitna plast na kovini ali zlitini nepropustna ali neporozna, se koroziija ustavi. Take plasti se naredijo na kromu, cinku, svincu, bakru, aluminiju, srebru ipd. Če pa je plast kovine propustna ali porozna, bodo plini še naprej prodirali skozi makroskopsko majhne luknjice do kovine ali zlitine in jo uničevali v notranjost, dokler je ne bodo v celoti preluknjali. To najbolj opazimo na

avtomobilskem blatniku. Korozija se pojavlja zaradi elektrokemičnih vplivov na stiku ali spoju dveh različnih kovin. Če v tak spoj pride vlaga, nastane galvanski člen, ki povzroči razjedanje kovin na stiku. Zato moramo spajanju različnih kovin posvetiti posebno pozornost. Največ izdelkov je iz jekel, katera so podvržena koroziji. Nekatera jekla pa so odporna proti koroziji. To dosežemo tako, da jim v glavnem dodamo krom in druge legirne elemente.

5 NERJAVNA JEKLA

Nerjavno jeklo je nizko karbonsko jeklo, vsebuje pa velike deleže kroma. Eurofor 88-71 definira nerjaveče jeklo kot železo, ki vsebuje najmanj 11 % kroma. Krom daje temu jeklu unikatno karakteristiko odpornosti na rjavenje. Osnovna zmes nerjavnega jekla so železo, krom in karbon, lahko pa vsebuje tudi druge elemente, kot so nikelj, molibden, silicij, titan itd.

Vsebnost kroma v jeklu omogoča, da se na površini kroma plast obogatene oksida naravno poda na površino jekla. Nerjaveč postane, ker se pri prisotnosti oksidirane okolja (vključno z zrakom) na površini jekla tvori zaščitni sloj, ki je grajen iz absorbiranega kisika iz okolja. Ta nevidna obloga ima debelino atoma in tvori eno vrsto zaščitne pregrade, ki ne dopušča oksidiranja in nastajanja rje. Če se površina tega zaščitnega sloja kemično ali mehansko poškoduje, se le-ta sama zaceli pod pogojem, da je prisoten kisik.

5.1 Proizvodnja nerjavnih jekel

Proizvodnja nerjavnih jekel temelji na dvostopenjskem procesu. V prvi stopnji uporabljamo klasično elektroobložno peč, v kateri hitro stalimo staro jeklo in cenene ferozlitine. Za dodajanje kroma nam služi ferokrom, ki vsebuje znatne količine ogljika. Talino z visokim deležem ogljika v drugi stopnji rafiniramo ali razogljimo z argonom in kisikom (AOD – Argon Oxygen Decarburization) ali z vakuumom in kisikom VOD (Vacuum Oxygen Decarburization). AOD proces se uporablja pri približno 80 % svetovne proizvodnje nerjavnih jekel. S tem postopkom proizvedemo v manj kot eni uri preko 100 t nerjavnega jekla. Dosežemo lahko delež ogljika pod 0,01 %.

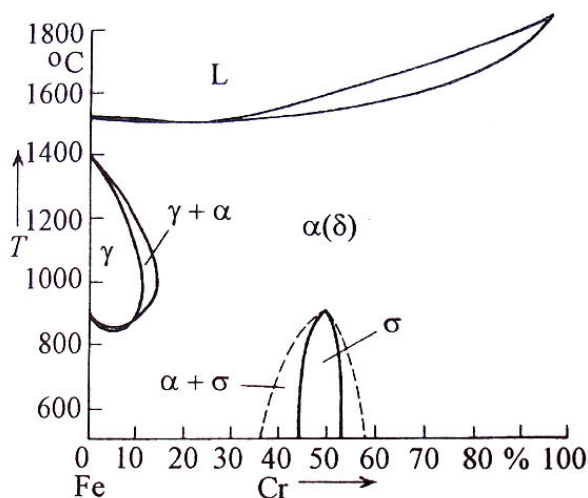
Znatne prihranke dosežemo z uporabo kontinuirnega litja (namesto klasičnega litja ingotov). Na ta način se je povečala konkurenčnost nerjavnih jekel v primerjavi s polimeri in aluminijevimi zlitinami. Največji napredek v proizvodnji je relativno cenena izdelava kvalitet z nizkimi deleži ogljika, torej z deleži pod 0,03 %.

5.2 Avstenitno–martenzitna transformacija

Ko jeklo segrevamo pri povišani temperaturi, ima ploskovno centrirano kubično strukturo (γ – avstenit), ko pa ga ohladimo na sobno temperaturo pri ne previsoki hitrosti ohlajanja, se transformira v prostorsko centriran α ferit, pri čemer se izloči delež ogljika. Feritna struktura je mehka in raztezna. Kadar pa avstenit ohladimo zelo hitro, nastane martenzit, kjer ostane velik delež prisilno raztopljenega ogljika v trdnini, saj difuzija ogljika zaradi hitrosti ohlajanja ne more poteči. Tako železo ne kristalizira kubično, ampak tetragonalno prostorninsko centrirano (martenzitna struktura), ki je trdno, vendar krhko.

5.2.1 Zlitine Fe-Cr

Zlitine Fe-Cr so osnova za veliko vrst mikrostruktur z znatno različnimi mehanskimi lastnostmi. Krom oži avstenitno področje, kar prikazuje ravnotežni diagram na sliki 5.



Slika 5: Ravnotežni diagram Fe-Cr (Kovač, 1999)

Dve glavni značilnosti, ki jih vidimo iz diagrama so:

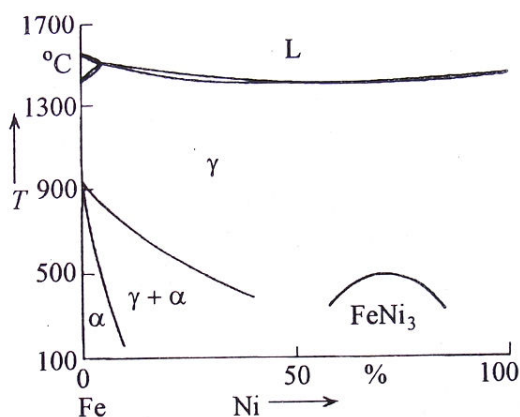
- prisotnost faze sigma (σ – faza) pri okoli 50 % Cr,
- omejeno področje faze gama (γ – faze).

Sigma faza je spojina, ki je trda ter krhka in lahko nastaja tudi v zlitinah, ki vsebujejo znatno pod 50 % Cr. Ta faza znatno poslabša korozijsko odpornost, zato se moramo izogibati zadrževanja v temperaturnem območju 750–820 °C, v katerem ta faza nastaja. Z ekonomskega vidika je najpomembnejše področje v Fe-Cr diagramu do 25 % Cr. Točka največje trdnosti Cr v avstenitu je pri 1050 °C, 0,1 % C in 13,5 % Cr. Pri jeklih z deležem kroma v tem področju (do 13,5 % Cr) se jim prekaljivost z deležem kroma zelo povečuje, da lahko tudi velike prereze prekalimo z ohlajanjem na zraku.

Pri deležih kroma nad 13 % dobimo pri temperaturi 1050 °C dvofazno mikrostrukturo, ki jo sestavljata avstenit in ferit. Pri ohlajanju takega jekla se avstenit transformira v martenzit, medtem ko ferit ne transformira. Ta faza je prostorsko centrirana kubična, imenujemo jo delta ferit (δ – ferit) zato, da jo razlikujemo od alfa ferita, ki je rezultat transformacije iz avstenita. Z večanjem kroma se večja tudi delež delta ferita, da pri 0,1 % C in nekoliko nad 18 % Cr postane jeklo popolnoma feritno.

5.2.2 Zlitine Fe-Cr-Ni

V železovih zlitinah je nikelj gamageni element, torej širi avstenitno področje, kar prikazuje slika 6.



Slika 6: Ravnotežni diagram Fe-Ni (Kovač, 1999)

Z dodajanjem niklja k zlitinam Fe-Cr kompenziramo učinek kroma. Jeklo z 0,1 % C in 17 % Cr ima po topilnem žarjenju pri 1050 °C mikrostrukturo iz 65 % delta ferita in 35 % avstenita. Z dodajanjem niklja zmanjšujemo delež delata ferita, tako da je

jeklo pri dodatku okrog 5 % Ni (niklja) pri temperaturi 1050 °C popolnoma avstenitno. Tako se z ohlajanjem transformira v martenzit in s tem se poviša trdnost jekla. Večje dodajanja niklja znižuje hitrost ohlajanja tako, kar povzroči nasprotni učinek. Železo se ohlaja počasneje in ne pride do popolne transformacije. Iz tabele 3 je razvidno kateri elementi so gamageni in kateri alfageni.

Tabela 3: Razdelitev legirnih elementov na gamagene in alfagene

GAMAGENI ELEMENTI		ALFAGENI ELEMENTI	
nikelj	Ni	krom	Cr
baker	Cu	aluminij	Al
mangan	Mn	vanadij	V
kobalt	Co	molibden	Mo
ogljik	C	silicij	Si
dušik	N	volfram	W

(Vir: Kovač, 1999)

5.3 Vrste nerjavnih jekel

Glavni legirni element pri nerjavnih jeklih je krom, toda mikrostruktura jekla je lahko martenzitna, avstenitna ali feritna, odvisno od toplotne obdelave in drugih legirnih elementov. Lastnosti nerjavnih jekel so bolj odvisne od mikrostrukture kot od kemične sestave.

5.3.1 Martenzitna nerjavna jekla

Popolnoma martenzitno mikrostrukturo nerjavnih jekel dobimo:

- z razmerjem legirnih elementov, ki dajejo pri temperaturi topilnega žarjenja (1050 °C) popolnoma avstenitno mikrostrukturo,
- temperatura transformacije mora biti nad sobno temperaturo (na to vplivajo tudi dodani legirni elementi).

Jekla z nekoliko večjim deležem ogljika 0,3 % (do 0,6 %) imajo višjo trdoto in jih uporabljamo kot jekla za nože. Z dodatki 0,15 % žvepla (S) ali 0,15 % selena (Se) dobimo avtomatna jekla (jekla za obdelavo). Primerno kombinacijo trdnosti in žilavosti dobimo s popuščanjem, pri tem lahko temperature popuščanja znašajo do 650 °C. Z dodatkom molibdena (Mo) in vanadija (V) povečamo popuščno odpornost.

5.3.2 Feritna nerjavna jekla

Feritna nerjavna jekla vsebujejo do 30 % Cr z dodatki drugih elementov, npr. Mo, ki poveča odpornost proti jamičasti koroziji in Ti ali Nb, ki povečata odpornost proti medkristalni koroziji.

Nekatera jekla imajo pri temperaturi topilnega žarjenja 950 °C delno avstenitno strukturo, ki se pri ohlajanju transformira v martenzit. Med naknadnim žarjenjem pri temperaturi 750 °C se martenzit spremeni v ferit in karbid, tako da postane mikrostruktura popolnoma feritna.

Z izločanjem kromovih karbidov po kristalnih mejah se lahko korozijska odpornost zelo poslabša. Ena izmed rešitev tega problema je dodajanje titana ali niobija, ki preprečita nastajanje kromovega karbida. Jekla z deležem kroma okrog 12 % so normalno martenzitna in zato slabo preoblikovalna in slabo variva. Z dodajanjem močnih alfa-genih elementov lahko dosežemo popolnoma feritno mikrostrukturo in na ta način izboljšamo preoblikovalnost in varivost. Feritna jekla imajo na splošno majhno žilavost, še večjo krhkost pa pričakujemo pri jeklih, ki vsebujejo nad 12 % Cr in jih zadržujemo v temperaturnem območju 400–550 °C. Največjo krhkost dobijo pri zadrževanju pri temperaturi 475 °C, zato ta pojav imenujemo »krhkost pri 475 °C«. Izguba žilavosti je posledica izločanja s kromom bogate alfa faze, kar se močno izraža pri jeklih z večjim deležem kroma. To krhkost lahko odpravimo s ponovnim segrevanjem na 600 °C in s hitrim ohlajanjem do sobne temperature.

5.3.3 Avstenitna nerjavna jekla

Največ avstenitnih nerjavnih jekel temelji na 18 % Cr in relativno velikim deležem Ni, ki ohranja avstenitno mikrostrukturo. Ta jekla so lahko preoblikovalna, tako da jih s plastično deformacijo utrjujejo. Niso pretirano abrazivno obstojna. Korozijsko odpornost lahko poslabša nastajanje kromovih karbidov, kar preprečujejo z dodajanjem titana ali niobija. V teh jeklih ne pride do medkristalne korozije. Imenujemo jih stabilizirana nerjavna jekla. Nastanek kromovega karbida v nerjavnih jeklih lahko preprečimo tudi tako, da zmanjšamo delež ogljika.

S plastično deformacijo (valjanje pri 950 °C) močno povečajo napetost tečenja. Na ta način utrjena jekla uporabljamo za nekatere tlačne posode in močno prednapete ojačitve v betonu.

5.3.4 Nerjavna jekla s kontrolirano transformacijo

Ta jekla so avstenitna po topilnem žarjenju in se jih v takem stanju tudi dobavlja. Z enostavno toplotno obdelavo jih lahko transformiramo v martenzitna. Nudijo kombinacijo ugodne preoblikovalnosti in visoke martenzitne trdnosti jekel. Sestavo jekla moramo obdržati v ozkem tolerančnem območju, da lahko dosežemo temperature transformacije tik pred sobno temperaturo. Po hladni predelavi lahko nato jeklo z avstenitno mikrostrukturo z ohlavitvijo, npr. -78 °C (s suhim ledom ali CO₂), transformiramo v martenzitno mikrostrukturo.

Ena od proizvodnih težav je zahtevna regulacija sestave, ki je potrebna za vzdrževanje temperaturnega območja transformacije tik pod temperaturo okolice. Drugi problem je, da se pri primarnem popuščanju pri 700 °C izločajo karbidi. To pomeni zvišanje temperature transformacije zaradi izločanja legirnih elementov. Zaradi izločanja ogljika s karbidi je transformiran martenzit tudi manj trden.

Značilnosti nerjavnih jekel s kontrolirano transformacijo so:

- delež kroma 15–17 %, ki zagotavlja dobro korozijsko odpornost,
- dovolj gamagenih elementov, da zagotavljajo avstenitno mikrostrukturo pri 1050 °C,
- takšna sestava elementov, da je področje martenzitne transformacije tik pred sobno temperaturo.

Nerjavna jekla s kontrolirano transformacijo so razvili predvsem za letalsko industrijo, na drugih področjih pa je njihova uporaba omejena zaradi:

- težavne regulacije sestave jekla med proizvodnjo,
- velikega utrjevanja med plastično deformacijo, kar omejuje preoblikovalnost jekel v hladnem stanju.

6 RAČUNALNIŠKI PROGRAM JMatPro

Računalniško orodje JMatPro pomaga pri računanju snovnih lastnosti jekel. Program na podlagi posebej oblikovanih baz podatkov in računskih procesov izračuna lastnosti željene zlitine, bodisi aluminijevih zlitin, nerjavnih jekel ipd. Ime je okrajšava **Java – based Material Properties**.

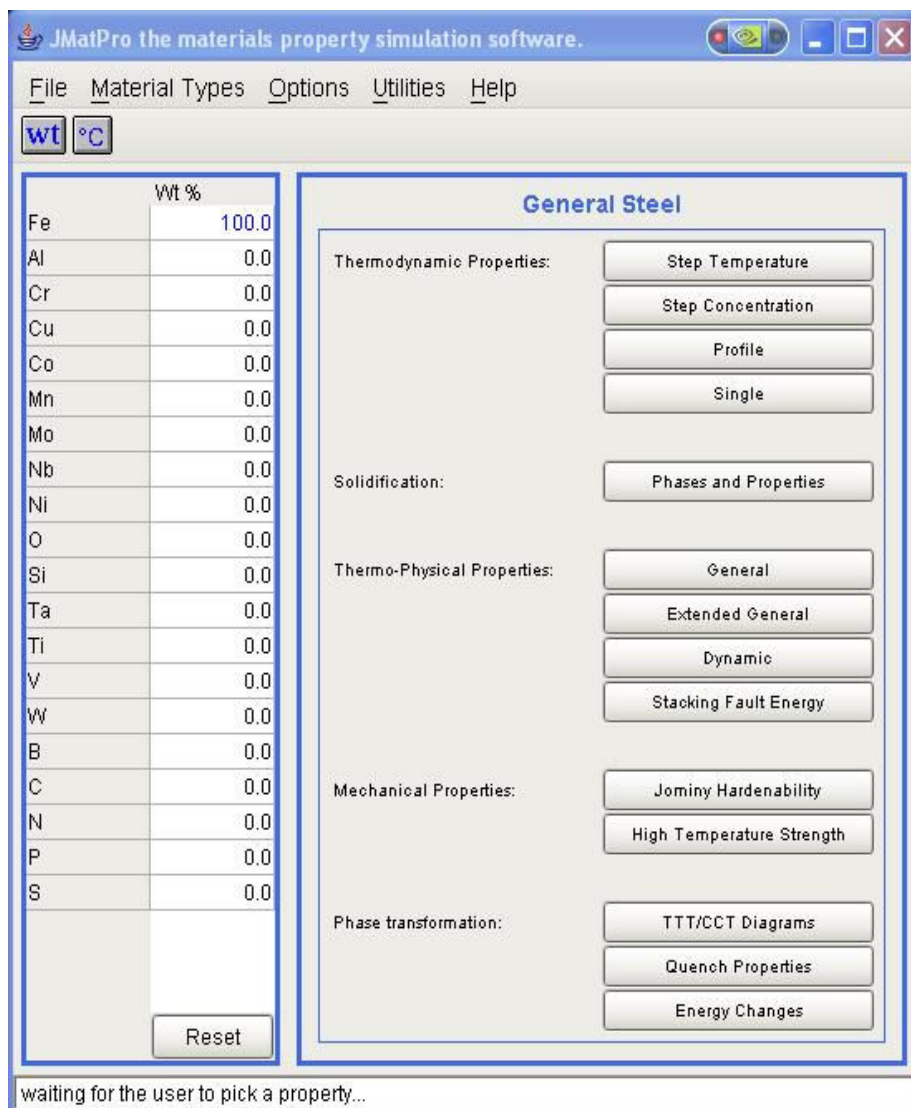
Z uporabo tega programa se znatno zmanjšajo čas in stroški za pridobitev lastnosti določenega jekla. Na zelo enostaven način lahko s spreminjanjem parametrov iščemo željene lastnosti jekla. Tako lahko najprej določimo, katere lastnosti jekla potrebujemo in nato iščemo kombinacijo elementov, ki bo te lastnosti imeli ali računamo lastnosti jekla, če poznamo sestavo.

Najprej se nam pokaže okno kot prikazuje slika 7, kjer izberemo za katero vrsto materiala bomo računali lastnosti.



Slika 7: Začetno okno programa JMatPro

V našem primeru (glede na izbrano vrsto jekla) izberemo opcijo General Steel (splošna jekla). Ko določimo kaj, želimo računati, se odpre naslednje okno, kjer lahko že vnašamo podatke in računamo željene procese in s tem pridobimo podatke, ki jih želimo.



Slika 8: Okno za vnašanje in računanje lastnosti

Iz slike 8 je razvidno, da se na levo stran vpisuje količine elementov v %, ki naj bi jih jeklo vsebovalo. Na desni strani se nahajajo gumbi, s katerimi se določa, katere lastnosti jekla želimo izračunati. Sami gumbi so razdeljeni na več skupin (mehanske termodinamske lastnosti). Pri določenih skupinah lahko pred računanjem spreminjamo določene parametre (temperatura avstenita ipd.). Program prikaže

končni rezultat izračuna kot graf, na katerem so izrisane željene lastnosti. Izračun lahko nato shranimo, da ni potrebno ponovno izvajati računanja. Izbrane podatke lahko shranimo kot sliko ali pa jih izvozimo v tekstovno datoteko.

Uporaba programa je zelo enostavna in predvsem hitra. Kar pa je najpomembnejše, precej ceneje od normalnega eksperimentalnega določanja snovnih lastnosti posameznih litin. Zaradi teh lastnosti je program JMatPro uporaben in dobrodošel v tem segmentu industrije.

6.1 Možnosti računanja računalniškega programa JMatPro

Omenjeni program ima široko paleto možnosti izračunavanja različnih snovnih lastnosti. Lastnosti zajema med samim litjem, po litju, ko se jeklo ohladi in po kaljenju jekla. Program lahko računa lastnosti za aluminijeve zlitine, magnezijeve zlitine, čisto železo, jekla, nerjavna jekla, titanijeve zlitine ipd.

6.1.1 Razširjene fizikalne lastnosti

V ta sklop spadajo vse fizikalne lastnosti, kot so mikrostrukturne faze med hlajenjem, gostota, linearni raztezek, toplotna prevodnost, električna upornost, električna prevodnost, viskoznost v tekočem stanju, kapljevite faze, entalpija in specifična toplota.

Za izračun omenjenih lastnosti je v programu uporabljena zelo obširna baza podatkov. Za vsako vrsto litine (aluminijeve zlitine, magnezijeve zlitine idr.) uporablja različno bazo podatkov. Vse baze podatkov so bile ustvarjene na podlagi preizkušanja jekel. Kljub dobri bazi podatkov lahko program, zahvaljujoč dobro ustvarjenih povezav med določenimi lastnostmi (toplotna in električna prevodnost), omogoči računanje drugih lastnosti brez uporabe baze podatkov (Saunders in drugi, 2003).

6.1.2 Mehanske lastnosti

Med mehanske lastnosti spadajo 0,2 % natezni preizkus, trdota in natezna trdnost. Mehanske lastnosti se izračunavajo na podoben način kot fizikalne lastnosti, torej z

uporabo razširjene baze podatkov. Če pa imamo določeno vrednost že znano, lahko le to enostavno pretvorimo v ostali dve (Saunders in drugi, 2003).

6.1.3 Fazne transformacije

V ta sklop štejemo TTT (time – temperature transformation), ki prikaže spremembe faz mikrostruktur glede na čas hlajenja, in CCT (continuous – cooling transformation), ki pa prikaže razlike pri mikrostrukturah glede na čas in temperaturo z neprestanim spreminjajočim hlajenjem..

V ta sklop spadajo tudi izračuni fizikalnih in mehanskih lastnosti po kaljenju. Program izračuna prej našteje lastnosti od gostote do trdot tudi po kaljenju. Gostota in ostale fizikalne lastnosti se pred in po kaljenju bistveno ne razlikujejo. Največje razlike prihajajo pri trdoti, natezni trdnosti in 0,2 % nateznega preizkusa (Saunders in drugi, 2003).

7 PRIMERJAVA SNOVNIH LASTNOSTI JEKEL 50CrV4 IN 51CrMoV4/52CrMoV4

7.1 Opis jekla 50CrV4

To jeklo spada med posebna legirna konstrukcijska jekla. Poboljša se ga s postopki za poboljšanje (kaljenje, popuščanje ipd.). Po poboljšanju je jeklo zelo odporno na obrabo, zato se uporablja za zelo obremenjene dele avtomobilov in gonila: veliki vrtalni drogovi, vzmeti, zobniki, zglobi, pogonske gredi, zglobe.

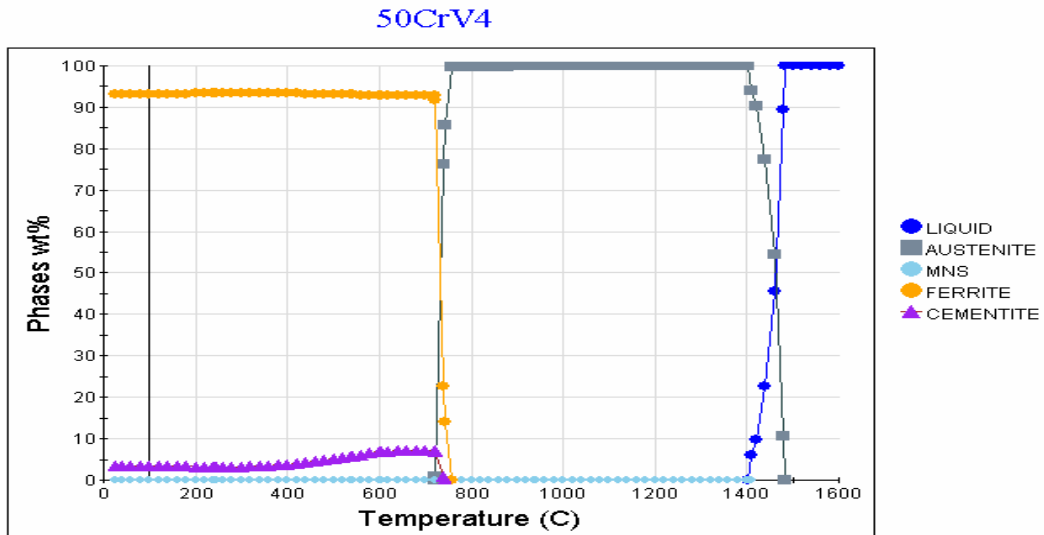
Sestava tega jekla je: Al = 0,02 %; C = 0,51 %; Cr = 1,05 %; Cu = 0,125 %; Mn = 0,9 %; Mo = 0,025 %; Ni = 0,1 %; Si = 0,275 %; V = 0,155 %; P = 0,0125 %; S = 0,0275 %; Sn = 0,0125 %.

7.2 Opis jekla 51CrMoV4/52CrMoV4

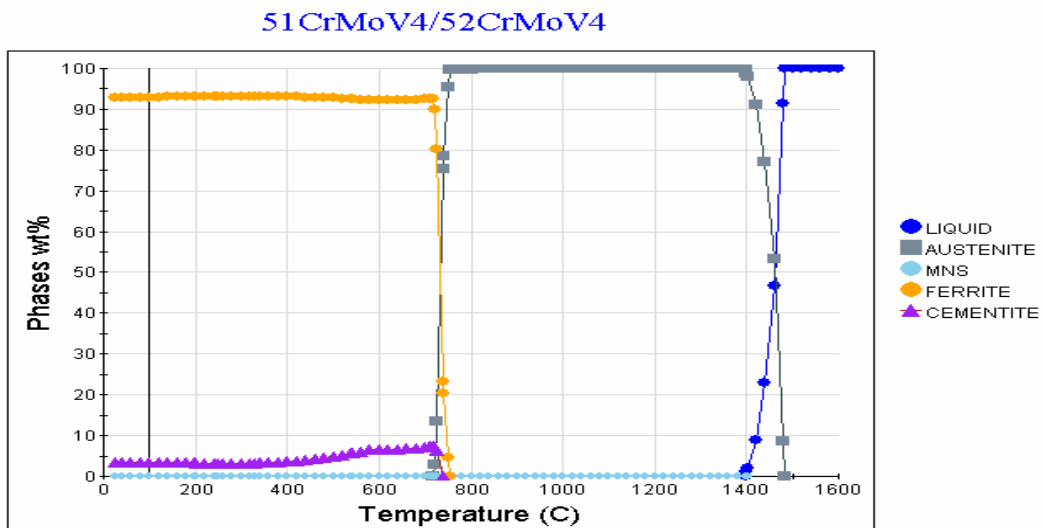
Tudi to jeklo spada med posebna konstrukcijska jekla. Navadno se površinsko kali. Uporablja se ga največ za močno obremenjene dele, kot so vzmeti za vozila: torzijske, vijačne, tlačne in natezne vzmeti, ročične gredi.

Sestava jekla je: Al = 0,0275 %; C = 0,52 %; Cr = 1,05 %; Cu = 0,125 %; Mn = 0,9 %; Mo = 0,2 %; Ni = 0,125 %; Si = 0,275 %; V = 0,095 %; P = 0,015 %; S = 0,0125 %; Sn = 0,015 %.

7.3 Primerjava snovnih lastnosti jekel 50CrV4 in 51CrMoV4/52CrMoV4 pri normalnem ohlajanju



Slika 9: Spreminjanje mikrostrukturnih faz jekla 50CrV4 pri normalnem ohlajanju (prevod legende: liquid – tekočina; austenite – avstenit; MnS – spojina MnS; ferrite – ferit; cemetite – cemetit)



Slika 10: Spreminjanje mikrostrukturnih faz jekla 51CrMoV4/52CrMoV4 pri normalnem ohlajanju

Shemi na slikah 9 in 10 sta si podobni, vendar z manjšimi razlikami. Jeklo 51CrMoV4/52CrMoV4 začne prehajati iz tekočega v trdno stanje pri 1483 °C in postane popolnoma trdo pri 1398 °C. Odstotek avstenita se veča od 1482 °C do 1398 °C, kjer doseže 99,98 % vrednost, padati pa začne pri 760 °C. Pri tej temperaturi se začne večati tudi odstotek ferita, ki narašča do temperature 718°C, kjer doseže 92 %. Pri tej temperaturi pa izgubimo sledi avstenita. 738 °C je točka, kjer se pojavi cementit, ki narašča do temperature 718 °C in doseže vrednost 7,3%, nato pa rahlo pada. Pri temperaturi 1400 °C se pojavi spojina MnS, ki se ohranja skoraj celoten proces na 0,03 %. MnS do temperature 100 °C ohranja skoraj isto vrednost, ferit pa rahlo narašča v sorazmerju z rahlim padanjem cementita.

Jeklo 50CrV4 začne prehod iz kapljevitega v trdno stanje pri 1483 °C in doseže popolno trdno stanje pri 1400 °C. Pri temperaturi 1483 °C se pojavi avstenit, ki narašča do temperature 1400 °C, kjer doseže 99,9 % vrednost. Avstenit začne padati pri 757 °C, odstotek ferita pa se začne večati. V temperaturnem območju od 757 °C do 719 °C pa ferit doseže maksimalno vrednost 92 %, avstenit pa stopnjo 0 %. Pri 742 °C se pojavi še cementit, ki sunkovito narašča do 720 °C, kjer doseže 7,05 % vrednost, nato pa rahlo pada. 1410 °C je točka, kjer se pojavi spojina MnS in hitro naraste na 0,075 % ter ohrani to vrednost. Tudi pri jeklu 50CrV4 do 100 °C ferit rahlo narašča s sorazmernim padanjem cementita.

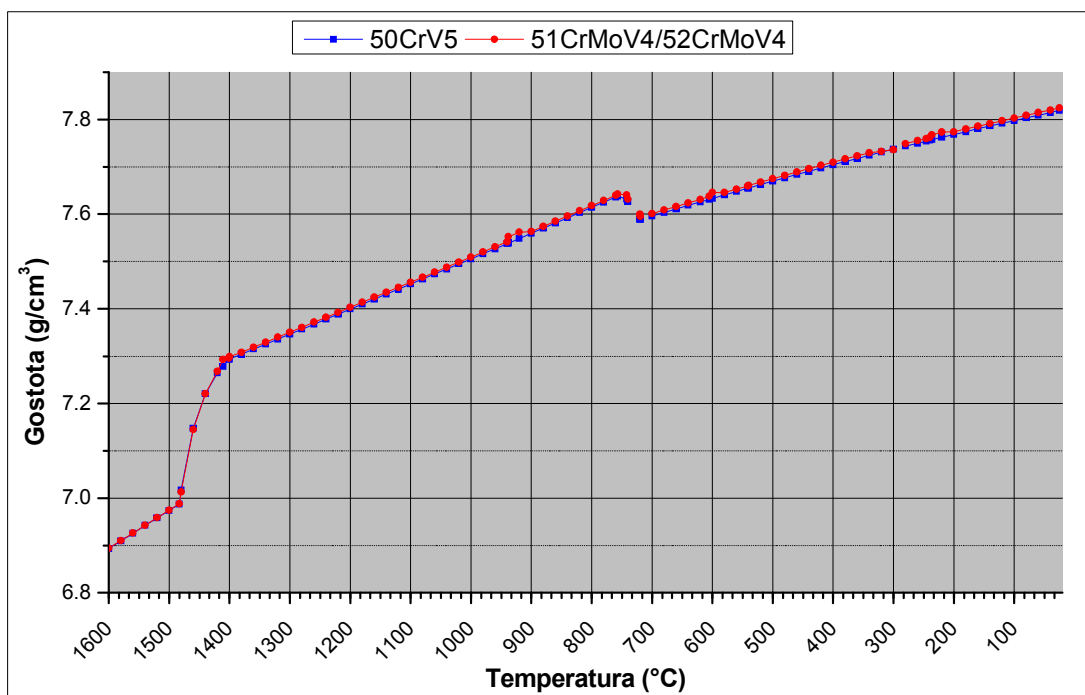
7.3.1 Primerjava gostote

Gostota (oznaka ρ) je fizikalna količina, določena za homogena telesa kot razmerje med maso m in prostornino telesa V :

$$\rho = m / V$$

Enota za merjenje gostote je kg/m³, g/cm³ ipd.

$$1000 \text{ kg/m}^3 = 1 \text{ g/cm}^3.$$



Slika 11: Primerjava gostote jekel 50CrV4 in 51CrMoV4/52CrMoV4

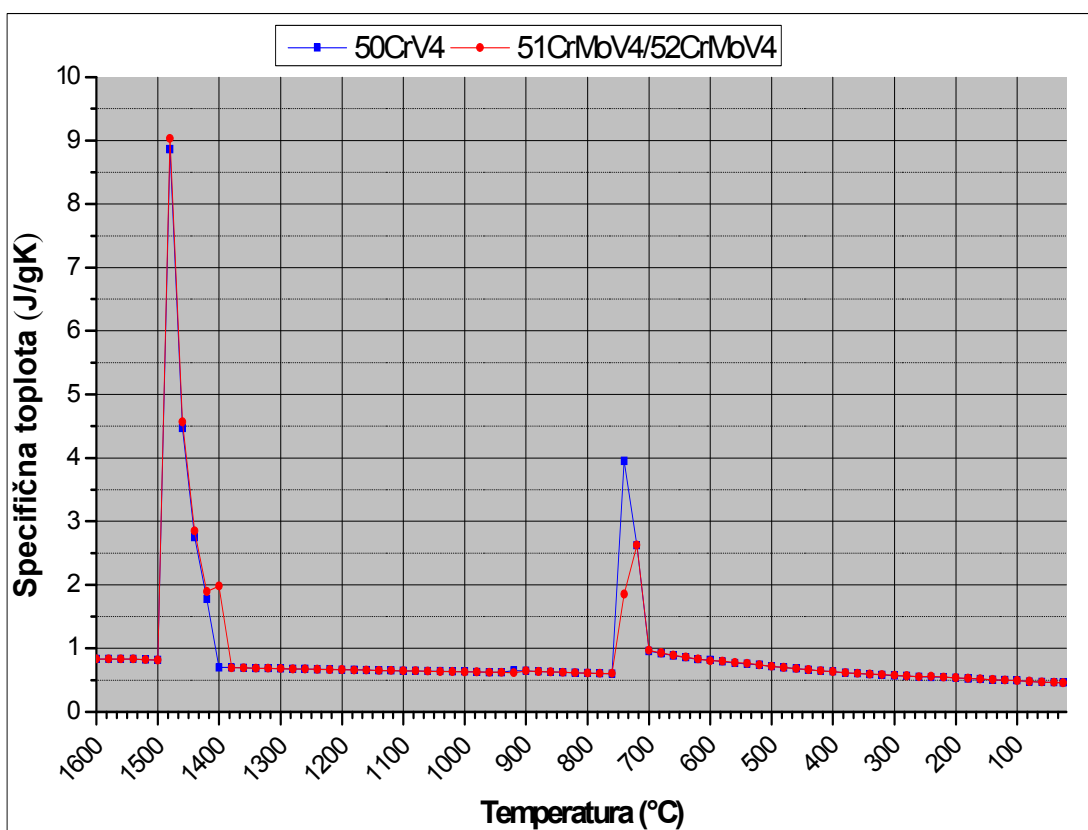
Pri normalnem ohlajanju se gostoti jekel ne razlikujeta veliko. Jekli sta do 1482 °C skoraj enakovredni. Po faznem prehodu jeklo 51CrMoV4/52CrMoV4 skoči na vrednost 7,3 g/cm³ pri 1398 °C, jeklo 50CrV4 pa na vrednost 7,29 g/cm³ pri 1400 °C. Pri nadaljnjem ohlajanju se gostoti skorej ne razlikujeta. Pri temperaturi 25°C pa imata obe jekli vrednost 7,82 g/cm³. Vse te podatke lahko odčitamo s slike 11.

7.3.2 Primerjava specifične toplote

Specifična toplota je toplota, ki je potrebna, da en kilogram snovi segrejemo za en kelvin. V splošnem je odvisna od vrste snovi. Mednarodni sistem enot predpisuje za specifično toploto enoto J/gK. Pri homogenih telesih je specifična toplota enaka toplotni kapaciteti na enoto mase telesa.

Iz slike 12 je razvidno, da jeklo 51CrMoV4/52CrMoV4 po predhodnih podobnih vrednostih doseže pri faznem prehodu rahlo višjo specifično toploto z vrednostjo 9,03 J/gK pri 1480 °C, medtem ko jeklo 50CrV4 pri isti temperaturi 8,86 J/gK. Po

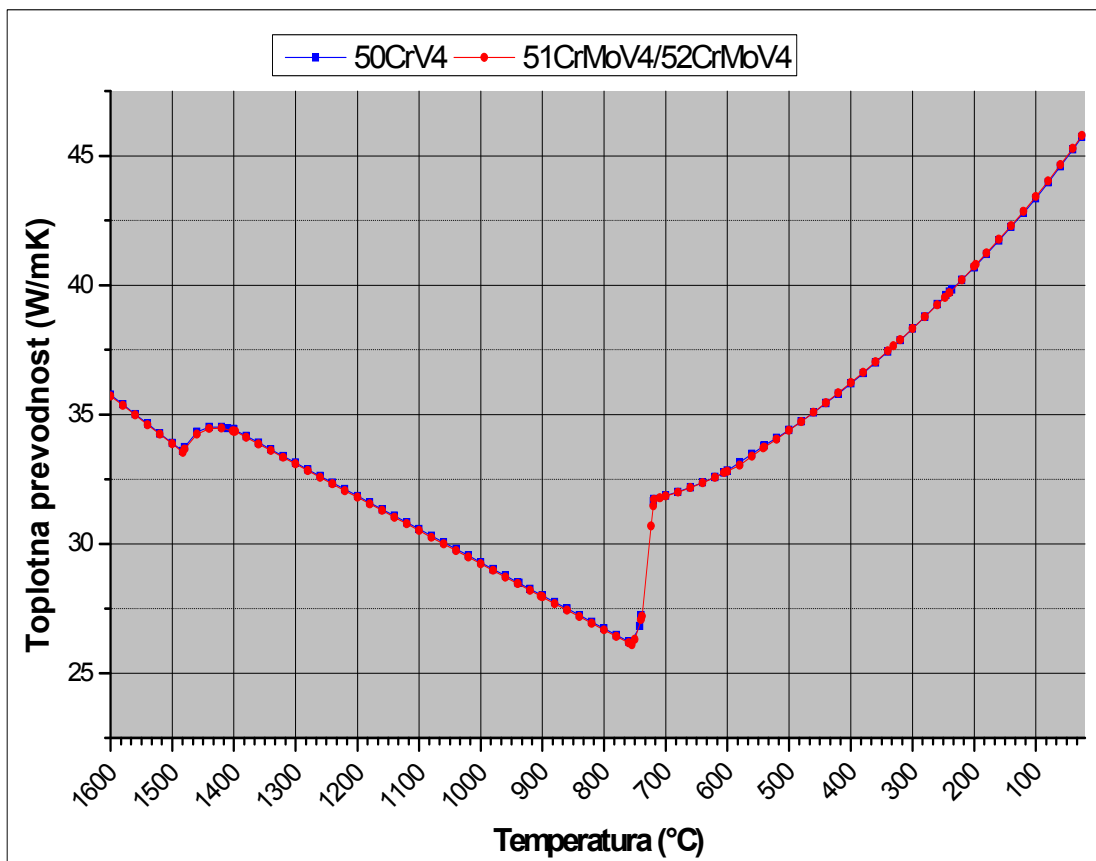
faznem prehodu jima vrednosti sunkovito padejo skoraj na začetne vrednosti, nato enakovredno padajo do faze spremembe avstenita v ferit, kjer spet poskočijo. Jeklo 50CrV4 doseže vrednost 3,95 J/gK pri 740 °C, drugo jeklo pa 2,63 J/gK pri 720 °C. Po spremembi spet padeta na skoraj skupne vrednosti in nadaljujeta pot do 25 °C, kjer ima jeklo 50CrV4 vrednost 0,45 J/gK, jeklo 51CrMoV4/52CrMoV4 pa 0,46 J/gK.



Slika 12: Primerjava specifične toplote jekel 50CrV4 in 51CrMoV4/52CrMoV4

7.3.3 Primerjava toplotne prevodnosti

Toplotna prevodnost (oznaka λ) je snovna lastnost, določena pri prevajanju toplote kot sorazmernostni koeficient med gostoto toplotnega toka in gradientom temperature. Mednarodni sistem enot predpisuje za toplotno prevodnost izpeljano enoto W/m K.



Slika 13: Primerjava toplotne prevodnosti med jekli 50CrV4 in 51CrMoV4/52CrMoV4

Obe jekli imata skozi celoten postopek ohlajanja skoraj podobne vrednosti toplotne prevodnosti, opazna je manjša razlika pri prehodu iz avstenita v ferit. Pri temperaturi 25 °C dosežeta naslednje vrednosti: 50CrV4 doseže 45,73 W/mK; 51CrMoV4/52CrMoV4 pa vrednost 45,78 W/mK, kot je prikazano na sliki 13.

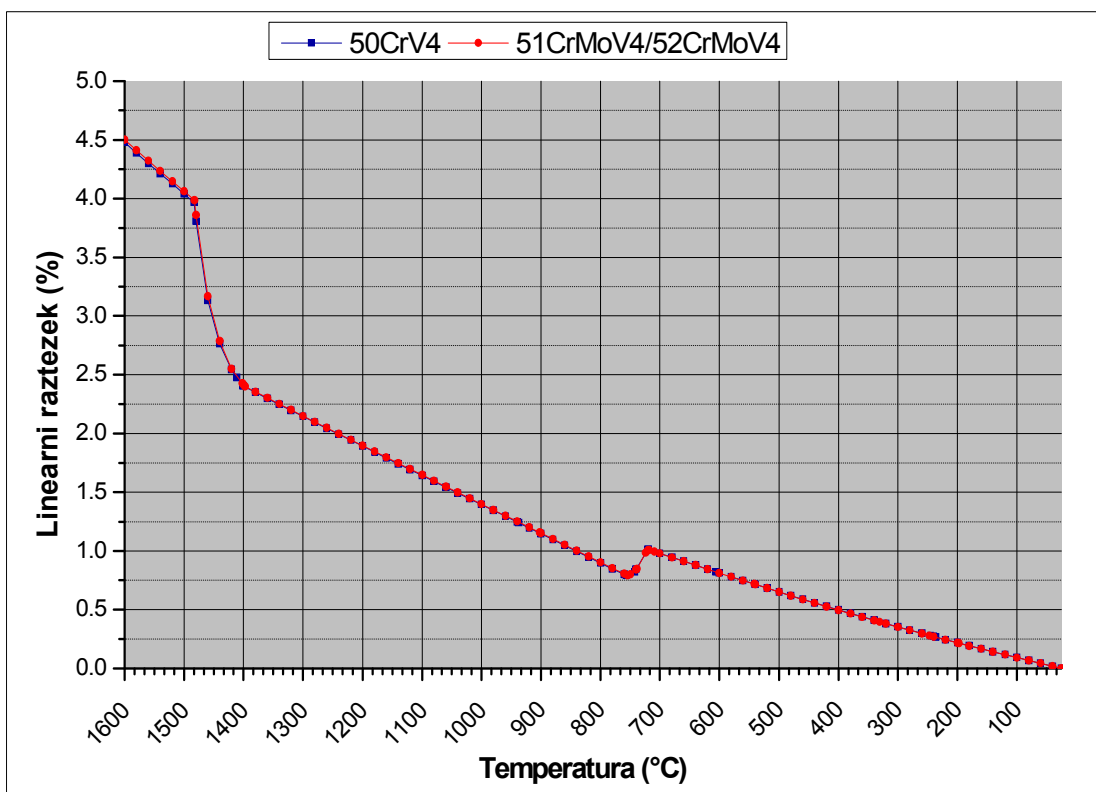
7.3.4 Primerjava linearnega raztezka

Zaradi povišanja temperature (dT) se predmet podaljša za $dL = \alpha \cdot L_0 \cdot dT$

Skupna dolžina predmeta je potem:

$$L = L_0 + dL = L_0 \cdot (1 + \alpha \cdot dT)$$

α je linearna temperaturna razteznost [K^{-1}], L_0 pa je prvotna dolžina telesa.

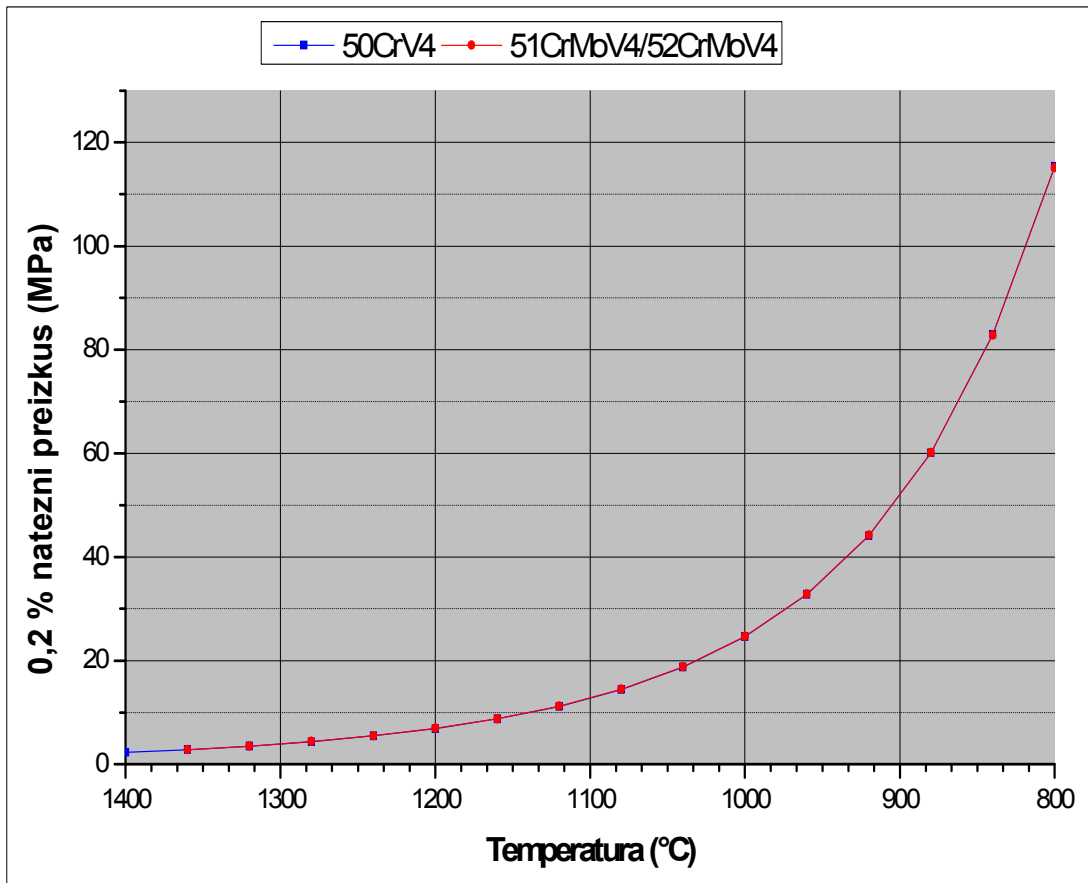


Slika 14: Primerjava linearnega raztezka med jekli 50CrV4 in 51CrMoV4/52CrMoV4

Na sliki 14 vidimo, da jeklo 50CrV4 pri 1600 °C doseže 4,48 % raztezek, jeklo 51CrMoV4/52CrMoV4 pa 4,5 % raztezek. Skoraj iste vrednosti držita skozi celoten proces do ohladitve na 25 °C, kjer imata obe jekli raztezek 0%. Majhna razlika (približno za 0,01 %) se pojavi le pri prehodu iz avstenita v ferit med 760 °C in 720 °C.

7.3.5 0,2 % natezni preizkus pri visoki temperaturi

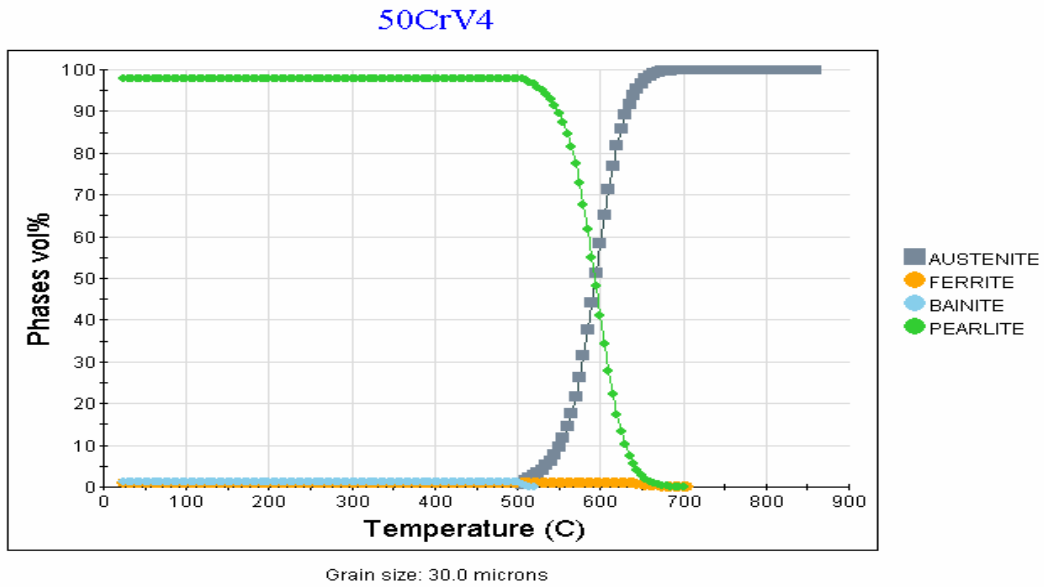
0,2 % preizkus razteznosti nam pove, koliko sile moramo uporabiti, da se določeno jeklo trajno deformira za 0,2 %.



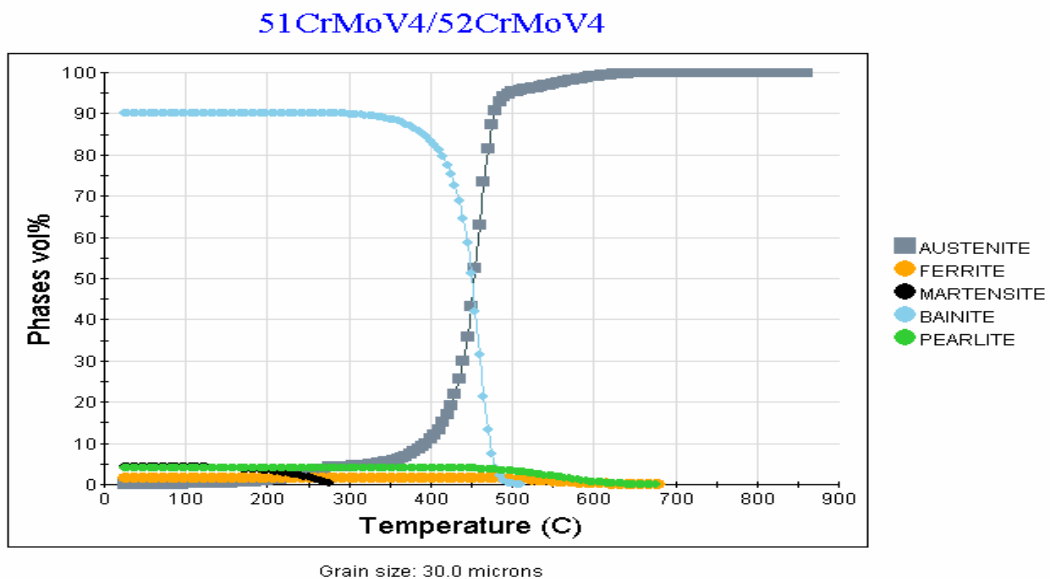
Slika 15: Primerjava 0,2 % nateznega preizkusa pri visoki temperaturi jekel 50CrV4 in 51CrMoV4/52CrMoV4

Slika 15 nam prikazuje, da med jekli skoraj ni razlike pri 0,2 % raztežku na visoki temperaturi. Pri vsaki temperaturni postavki je razlika okrog 0,12 MPa potrebne moči, da se jeklo raztegne za 0,2 %.

7.4 Primerjava snovnih lastnosti jekel 50CrV4 in 51CrMoV4/52CrMoV4 po kaljenju



Slika 16: Mikrostrukturne faze jekla 50CrV4 po kaljenju (prevod legende: austenite – avstenit; ferrite – ferit; bainite – bainit; pearlite – perlit)

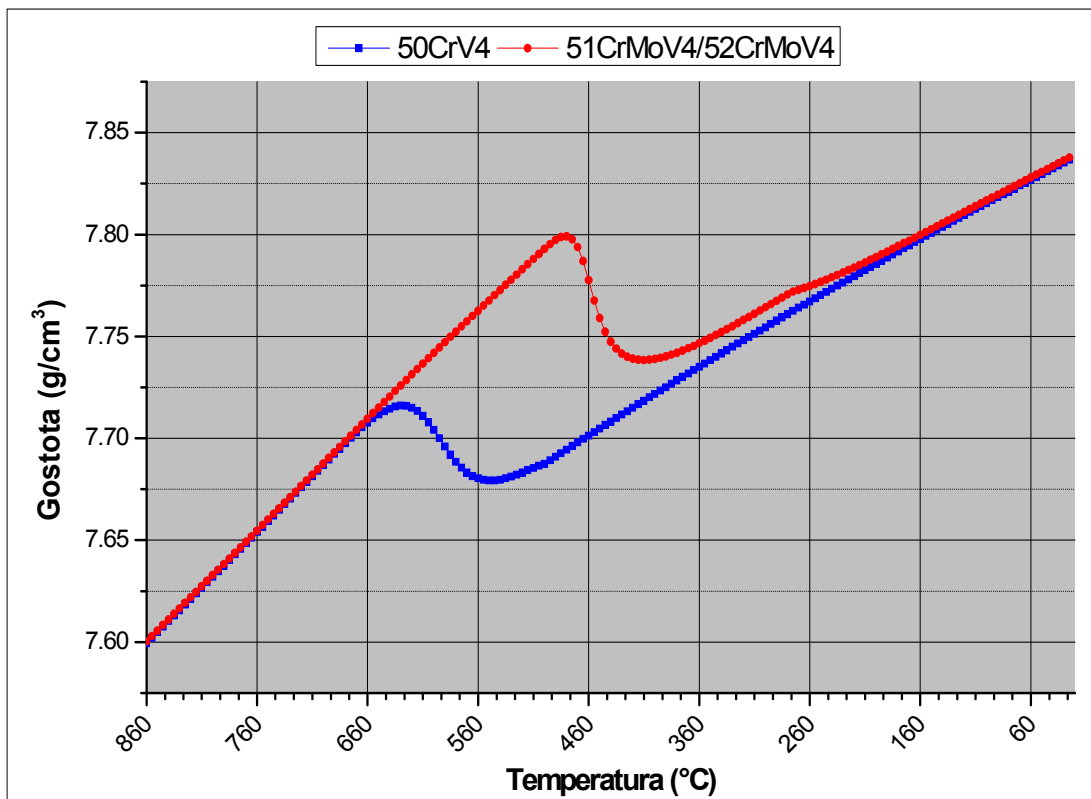


Slika 17: Mikrostrukturne faze jekla 51CrMoV4/52CrMoV4 po kaljenju

Iz slike 16 je razvidno da jeklo 50CrV4 je sestavljeno iz avstenita, ferita, perlita in bainita. Avstenit začne pri temperaturi 690 °C padati do temperature 500°C, kjer doseže najnižjo vrednost. Pri temperaturi 700 °C se začne dvigovati ferit do 640 °C, kjer doseže stopnjo 0,87 %. Nato zelo rahlo pade na 0,86 % in tudi obstane do sobne temperature. Perlit začne naraščati pri temperaturi 700 °C in naraste do končne vrednosti 97,77 % pri 500 °C, kjer ostane do sobne temperature. Bainit se pojavi pri 520 °C in hitro naraste na 1,37 %. To vrednost obdrži do sobne temperature. Na koncu je jeklo sestavljeno iz 97,77 % perlita, 1,37 % bainita in 0,86 % ferita.

Na sliki 17 pa vidimo da jeklo 51CrMoV4/52CrMoV4 ima veliko bolj zapleteno sestavo. Sestavljeno je iz avstenita, ferita, martenzita, bainita in perlita. Avstenit počasi pada od 620 °C do 490 °C. Od tu do 375 °C sunkovito pade in se do 270 °C skoraj ne spremeni. Potem pa spet rahlo pada do sobne temperature 25 °C, kjer doseže vrednost 0,038 %. Ferit se začne ustvarjati pri 680 °C in narašča do temperature 475 °C pri vrednosti 1,48 %, nato pa zelo rahlo pada do sobne temperature. Martenzit se začne vzpenjati pri temperaturi 275 °C in narašča do sobne temperature, kjer doseže 4,4 %. Bainit naraste med 510 in 300 °C ter doseže 90,02 %, kjer ostane do sobne temperature. Perlit se povzpe na 4,13 % med 675 in 370 °C ter se tudi ne spremeni do sobne temperature. Na koncu je to jeklo sestavljeno iz 89,98 % bainita, 4,4 % martenzita, 4,12 % perlita, 1,46 % ferita in 0,038 % avstenita.

7.4.1 Primerjava gostote po kaljenju

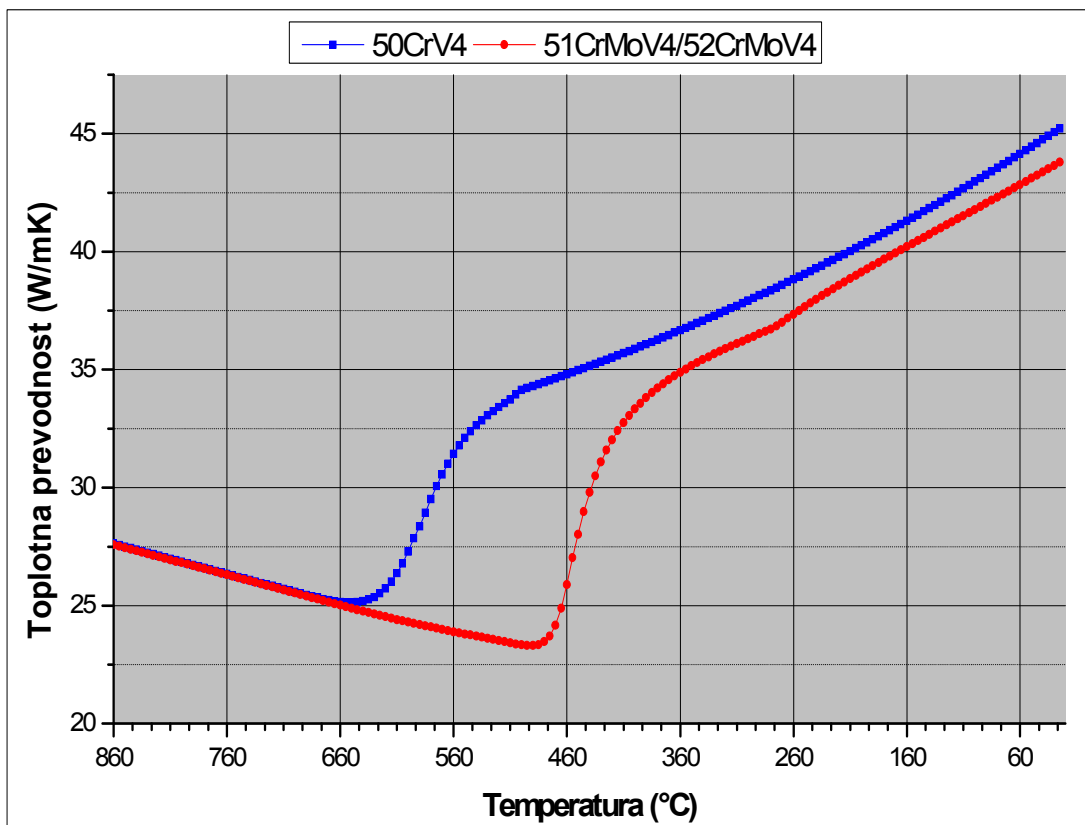


Slika 18: Primerjava gostot jekel 50CrV4 in 51CrMoV4/52CrMoV4 po kaljenju

Vrednosti se na visoki temperaturi skoraj ne razlikujeta. Pri fazi spreminjanja iz avstenita v druge strukture (ferit, perlit itd.) pa se jekli razlikujeta, ker se fazi pri jeklih temperaturno razlikujeta za več kot 100 °C. Pri jeklu 50CrV4 je temperaturno območje spreminjanja med 620 in 550 °C, jeklo 51CrMoV4/52CrMoV4 pa ima območje med 480 in 420 °C. Po koncu spreminjanja se jekli spet skoraj izenačita in pri 25 °C dosežeta vrednost 7,84 g/cm³. To je lahko razvidno iz slike 18.

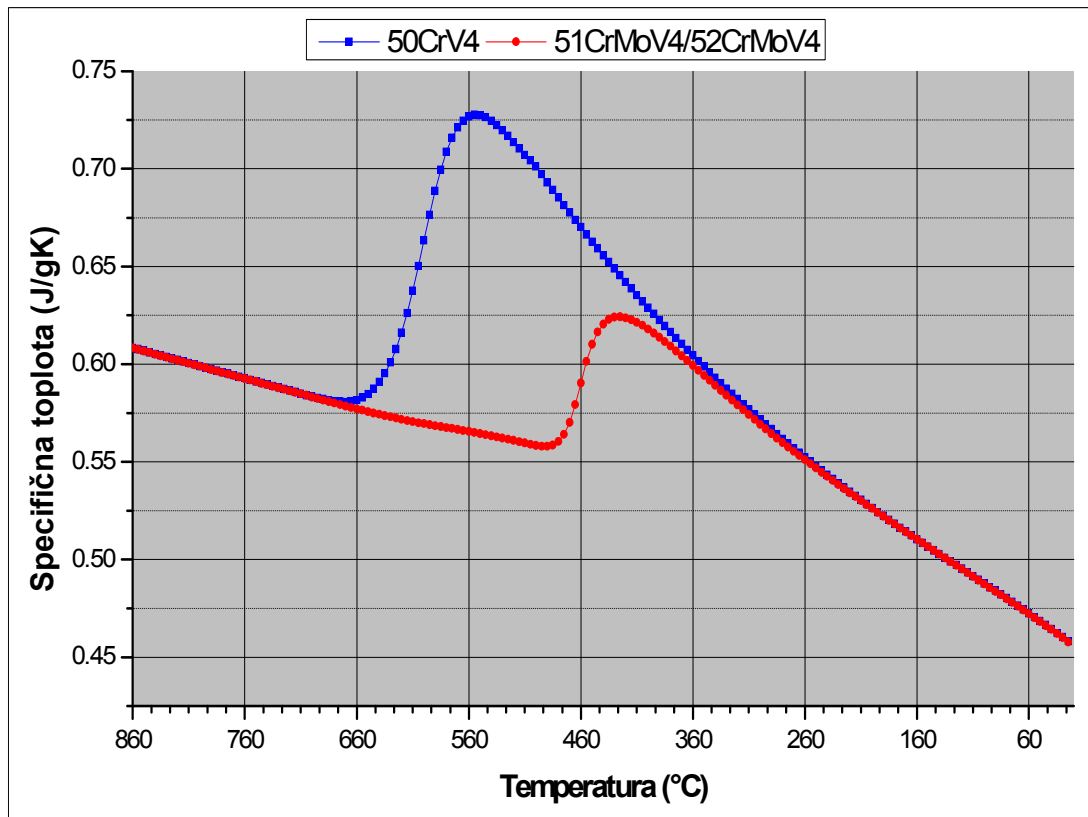
7.4.2 Toplotna prevodnost po kaljenju

Tudi slika 19 prikazuje edino razhajanje vrednosti toplotne prevodnosti pri prehodu avstenita. Na začetku (pri 860 °C) sta si jekli skoraj enakovredni. Rahlo se razhajata na koncu pri 25 °C. Jeklo 50CrV4 ima pri 25 °C toplotno prevodnost 45,23 W/mK, jeklo 51CrMoV4/52CrMoV4 pa 43,79 W/mK.



Slika 19: Primerjava toplotne prevodnosti med jekli 50CrV4 in 51CrMoV4/52CrMoV4 po kaljenju

7.4.3 Primerjava specifične toplote po kaljenju

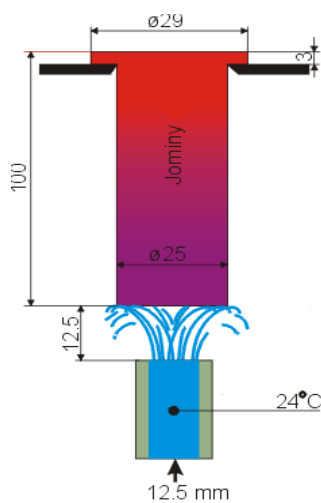


Slika 20: Primerjava specifične toplote jekel 50CrV4 in 51CrMoV4/52CrMoV4 po kaljenju

Slika 20 prikazuje specifično toploto omenjenih jekel in prikazuje skoraj enakovredne vrednosti. Le pri temperaturah spreminjanja avstenita se jekli razideta. Potem se spet vrmeta na skupne vrednosti do ohladitve na 25 °C.

7.4.4 Jominyjev preizkus kaljivosti

Pri ohlajanju obdelovancev v poljubnem hladilnem sredstvu se največja ohlajevalna hitrost doseže v njegovem plašču in pojema proti jedru. Posledično se spreminja tudi mikrostruktura. Pod pojmom kaljivost razumemo največjo trdoto, ki jo lahko dosežemo v nekem jeklu pri kaljenju, ter tudi globino, do katere se jeklo prekali. Trdota martenzita je v glavnem odvisna le od deleža ogljika, ki je raztopljen v avstenitu, medtem ko globino, do katere se jeklo prekali, močno povečajo zlitinski elementi z izjemo kobalta. **Po dogovoru je jeklo prekaljeno do globine, kjer je v**



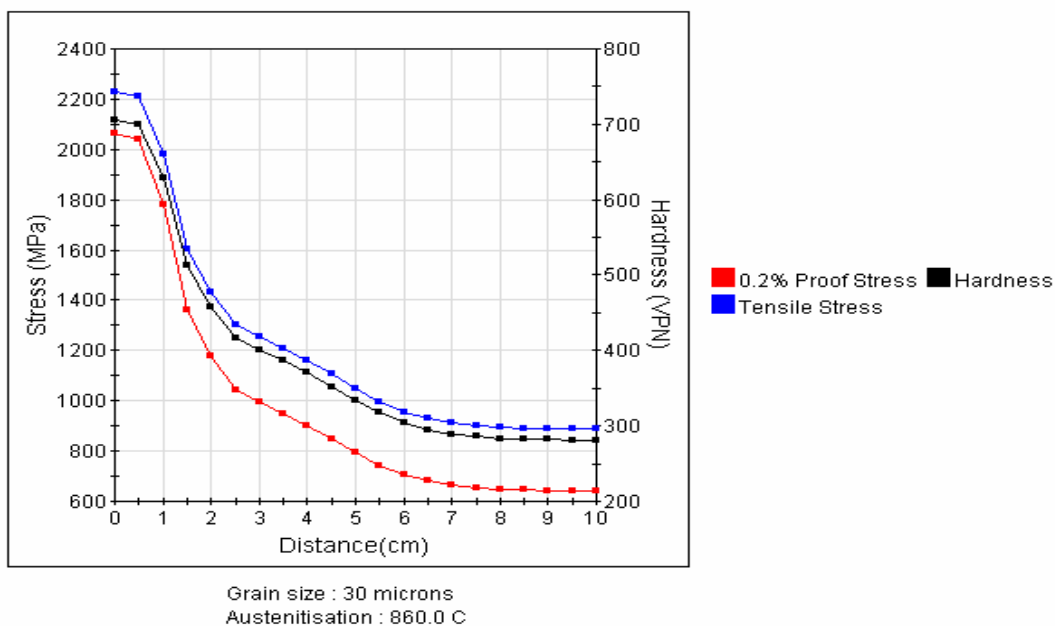
mikrostrukturi 50 % martenzita. Pri slabo kaljivem jeklu se trdota hitro zmanjšuje z oddaljenostjo od površine, pri dobro prekaljivem pa počasi. Na sliki 21 je razviden potek Jominyjevega preizkusa kaljivosti. Valj jekla premera 25 mm in dolžine 100 mm segrejemo na kalilno temperaturo, nato začnemo kaliti samo na eni ploskvi z določenim curkom vode. Tako ugotovimo, kako se spremeni struktura jekla tudi v globini.

Slika 21: Prikaz Jominyjevega preizkusa kaljivosti

Na slikah 22 in 23 vidimo razliko med jekli. Pri razdalji 0 cm sta si jekli skoraj enakovredni, vendar jeklo 51CrMoV4/52CrMoV4 rahlo prevladuje. Z dolžino vse vrednosti padajo, vendar jeklu 50CrV4 padajo hitreje. Na dolžini 10 cm dolge palice je opazna velika razlika med jekli.

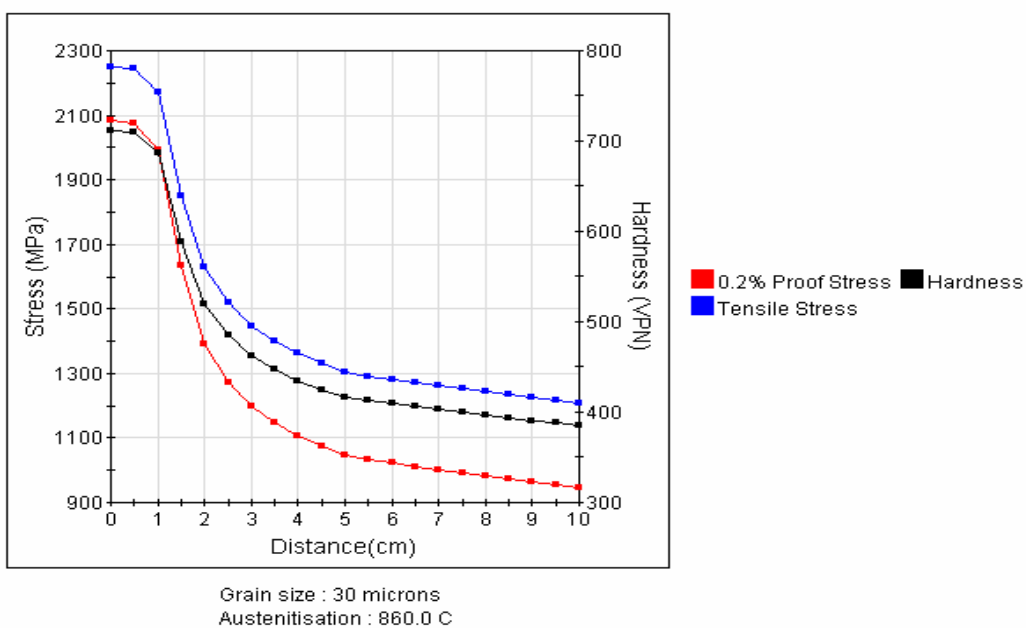
Jeklo 50CrV4 ima na dolžini 10 cm natezno trdnost 886,35 MPa, jeklo 51CrMoV4/52CrMoV4 pa 1205,82 MPa. Razlika je opazna tudi pri trdoti. Prvo ima trdoto 281,29 VPN, 51CrMoV4/52CrMoV4 pa 384,97 VPN. Pri 0,2% nateznem preizkusu se spet opazi občutno razliko. Jeklo 50CrV4 doseže vrednost 640,65 MPa, medtem ko iz drugega diagrama razberemo, da jeklo 51CrMoV4/52CrMoV4 doseže vrednost 945,92 MPa.

50CrV4



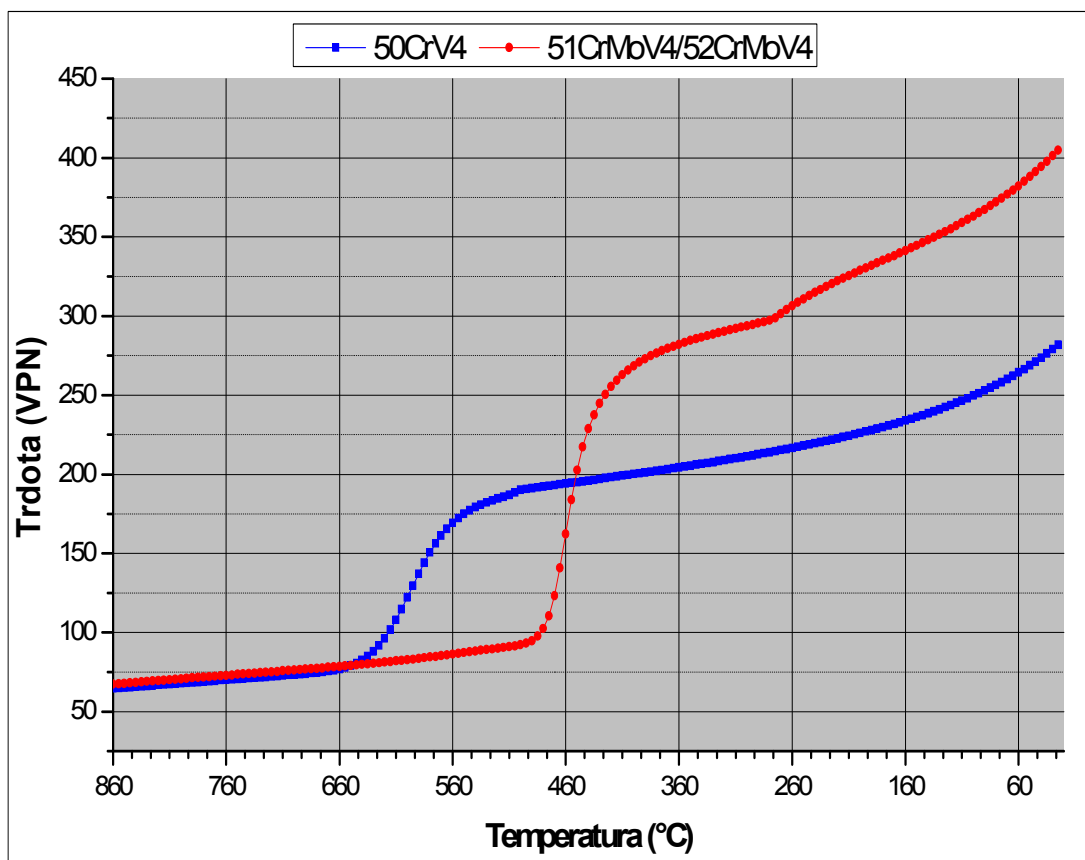
Slika 22: Diagram Jominyjevega preizkusa kaljivosti za jeklo 50CrV4 (prevod legende: 0,2 % poof stress – 0,2 % natezni preizkus; hardness – trdota; tensile stress – natezna trdnost)

51CrMoV4/52CrMoV4



Slika 23: Diagram Jominyjevega preizkusa kaljivosti za jeklo 51CrMoV4/52CrMoV4

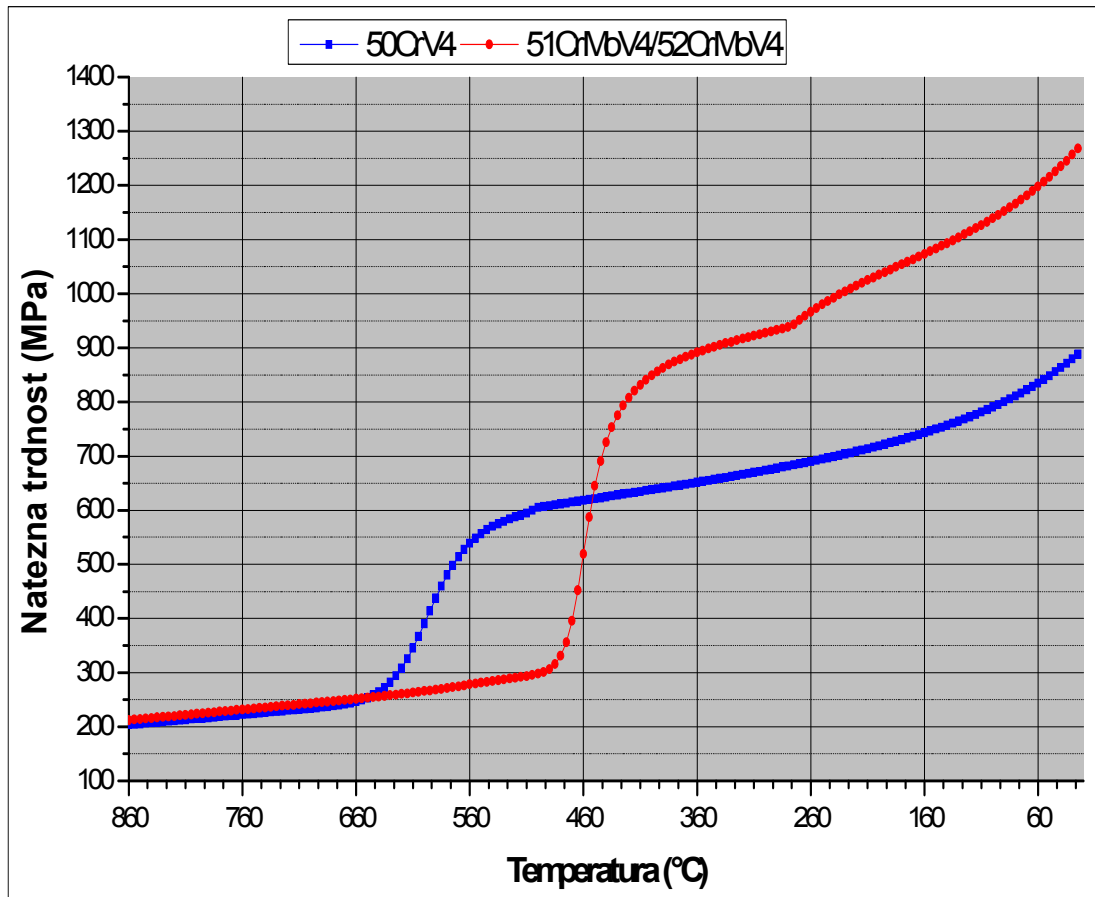
7.4.5 Primerjava trdote po kaljenju



Slika 24: Primerjava trdote jekel 50CrV4 in 51CrMoV4/52CrMoV4 po kaljenju

Slika 24 prikazuje, da pri temperaturi 860 °C imata jekli skoraj enakovredne vrednosti. Razhajanja se začnejo pri temperaturah spreminjanja avstenita. Jeklo 50CrV4 začne sunkovito naraščati pri 655 °C s trdoto 77,8 VPN in konča pri 520 °C s trdoto 184,58 VPN. Nato skoraj enakomerno narašča do temperature 25 °C, kjer doseže trdoto 281,84 VPN. Jeklo 51CrMoV4/52CrMoV4 pa doseže temperaturo prehoda pri 490 °C in trdoto 94,87 VPN, konča pa pri 400 °C s trdoto 268,5 VPN. Do temperature 25 °C narašča skoraj enakomerno, vendar strmo, dokler ne doseže trdote 405,03 VPN.

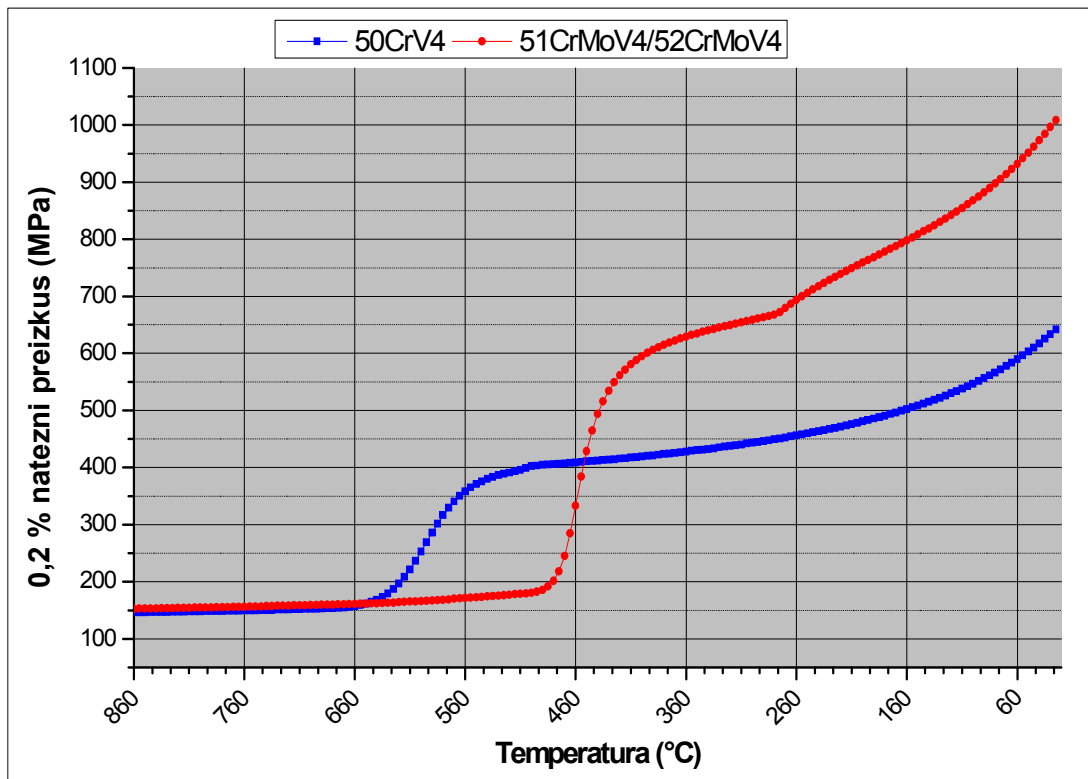
7.4.6 Primerjava natezne trdnosti po kaljenju



Slika 25: Primerjava natezne trdnosti jekel 50CrV4 in 51CrMoV4/52CrMoV4 po kaljenju

Tako kot pri trdoti se tudi pri natezni trdnosti jekli začneta razlikovati v temperaturnem območju transformacije avstenita. Pri 25 °C pa je razlika očitna. Jeklo 50CrV4 doseže vrednost le 888,04 MPa, jeklo 51CrMoV4/52CrMoV4 pa doseže pri 25 °C natezno trdnost 1268 MPa. To je razvidno na sliki 25.

7.4.7 Primerjava 0,2 % nateznega preizkusa po kaljenju



Slika 26: Primerjava 0,2 % nateznega preizkusa pri jeklih 50CrV4 in 51CrMoV4/52CrMoV4 po kaljenju

Tudi slika 26 prikazuje podobno shemo. Pri 680 °C imata jekli skoraj podobne vrednosti. Razhajati se začneta v temperaturnem območju spremembe avstenita. Jeklo 50CrV4 doseže pri temperaturi 25 °C 0,2 % natezni preizkus silo 642,16 MPa, jeklo 51CrMoV4/52CrMoV4 pa pri isti temperaturi doseže vrednost kar 1009,02 MPa.

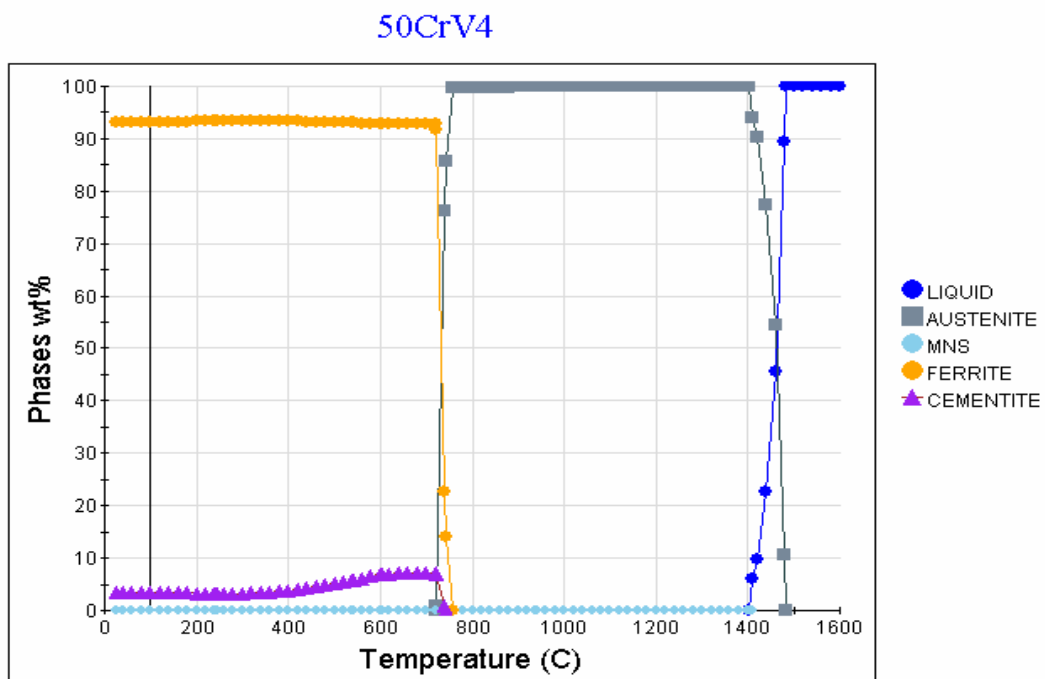
8 PRIMERJAVA SNOVIH LASTNOSTI JEKEL 50CrV4 IN 50CrV4 + 10 %

V nadaljevanju bomo primerjali jeklo 50CrV4, ki ga že poznamo, in jeklo 50CrV4 + 10 %. Razlika med jekli je v tem, da smo jeklu 50CrV4 spremenili količino elementov za 10 %. Tako je jeklo 50CrV4 + 10 % sestavljeno iz naslednjih elementov:

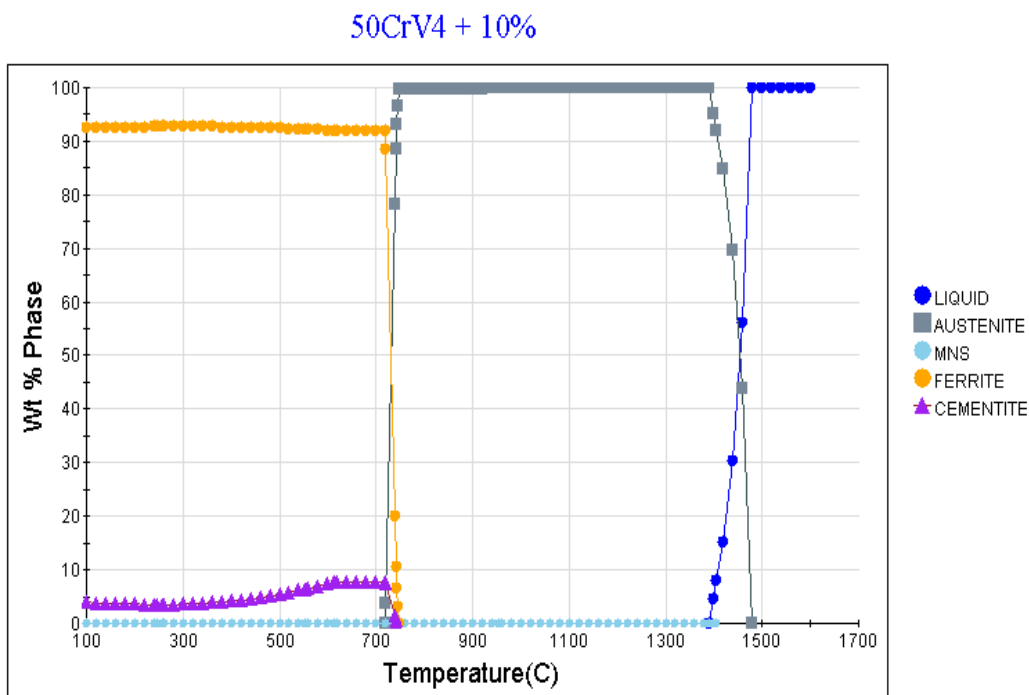
Al = 0,022 %; C = 0,561 %; Cr = 1,155 %; Cu = 0,1375 %; Mn = 0,99 %; Mo = 0,0275 %; Ni = 0,11 %; Si = 0,3025 %; V = 0,1705 %; P = 0,01375 %; S = 0,03025 %; Sn = 0,01375 %

Jeklu 50CrV4 smo spremenili sestavo za nadaljno preizkavo, da dokažemo, kako že majhne spremembe v sestavi vplivajo na končne lastnosti jekla.

8.1 Primerjava snovnih lastnosti jekel 50CrV4 in 50CrV4 + 10% pri normalnem ohlajanju



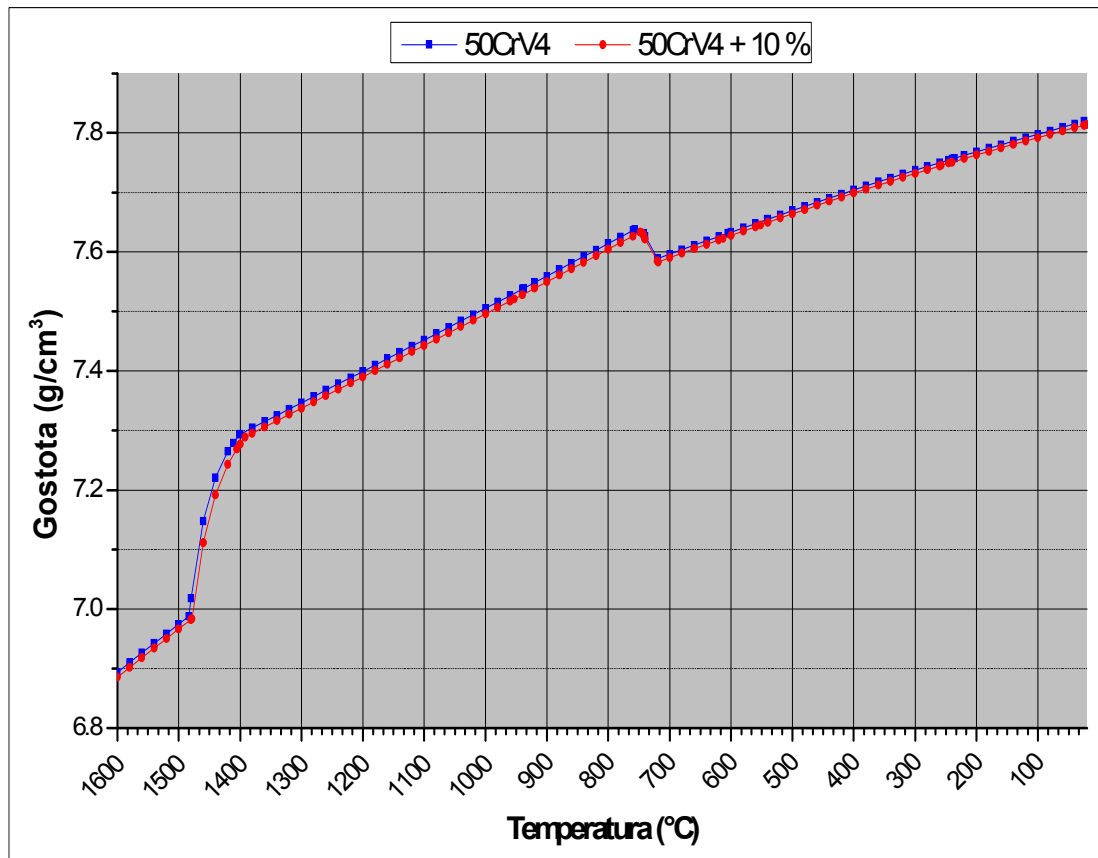
Slika 27: Spreminjanje mikrostrukture jekla 50CrV4 pri normalnem ohlajanju



Slika 28: Spreminjanje mikrostrukture jekla 50CrV4 + 10 % pri normalnem ohlajanju

Sliki 27 in 28 sta si zelo podobni. Večje razlike se kažejo pri pojavu spojine MnS, ki se pri jeklu 50CrV4 pojavi pri 1410 °C in doseže vrednost 0,075 %, pri jeklu 50CrV4 + 10 % pa pri temperaturi 1400 °C in doseže vrednost 0,08 %. Sprememba avstenita v druge mikrostrukture se pri jeklu 50CrV4 začne pri 757 °C, pri jeklu 50CrV4 + 10 % pa pri 747 °C. Tudi vrednosti ferita so skoraj enake. Cementit, ki se pri obeh jeklih pojavi (742 °C) in doseže vrednosti pri jeklu 50CrV4 7,05 %, pri drugem pa 7,76 %. Nato začne pri temperaturi 612 °C padati, tako da doseže pri temperaturi 25 °C pri jeklu 50CrV4 vrednost 3,55 %, pri jeklu 50CrV4 pa 4,21 %.

8.1.1 Primerjava gostote

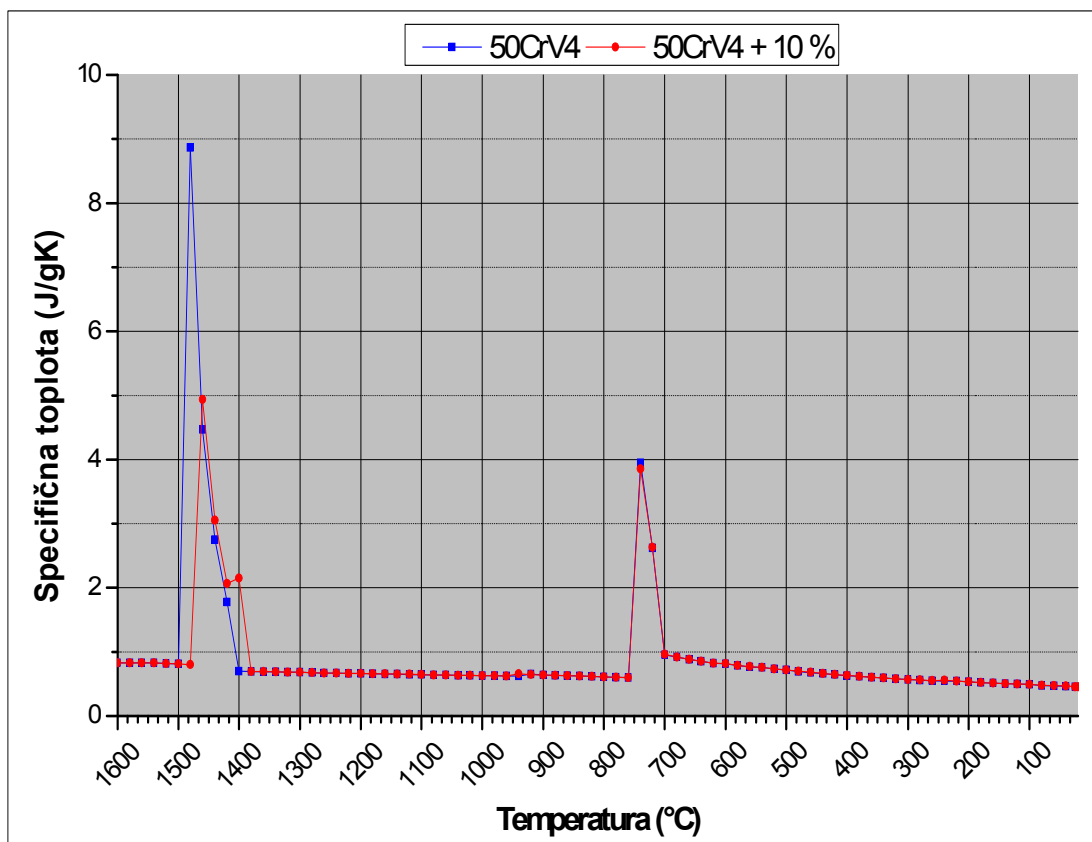


Slika 29: Primerjava gostote jekla 50CrV4 in jekla 50CrV4 + 10 %

Slika 29 prikazuje primerjavo gostote jekel 50CrV4 in 50CrV4 + 10 %. Gostota se pri obeh omenjenih jeklih bistveno ne razlikuje. Skozi celoten proces ohlajanja ostajata na skoraj enakih vrednostih. Razlika je skoraj vedno za $0,01 \text{ g/cm}^3$ in pri $25 \text{ }^\circ\text{C}$ končata na skoraj enaki vrednosti. Jeklo 50CrV4 doseže gostoto $7,82 \text{ g/cm}^3$, jeklo 50CrV4 + 10 % pa $7,81 \text{ g/cm}^3$.

8.1.2 Primerjava specifične toplote

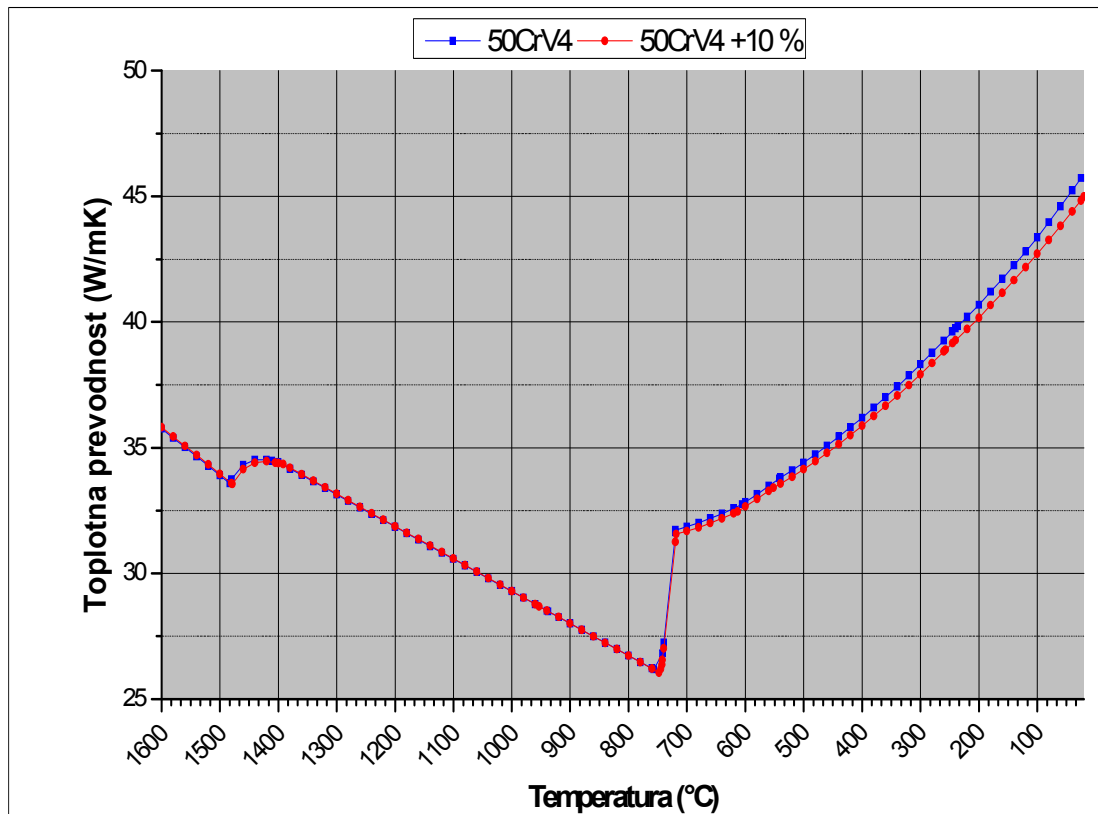
Na sliki 30 vidimo, da imata jekli skoraj vedno podobne vrednosti. Največja razhajanja nastanejo v temperaturnem segmentu faznega prehoda, ko jeklo 50CrV4 doseže vrednost 8,86 J/gK, jeklo 50CrV4 pa le 4,93 J/gK. Manjše razlike nastanejo tudi pri spremembi avstenita v druge mikrostrukture. Nato se vrednosti spet združijo in enakomerno ter usklajeno padajo do temperature 25 °C kjer jeklo 50CrV4 doseže vrednost 0,45 J/gK, jeklo 50CrV4 + 10 % pa vrednost 0,46 J/gK.



Slika 30: Primerjava specifične toplote jekel 50CrV4 in 50CrV4 + 10 %

8.1.3 Primerjava toplotne prevodnosti

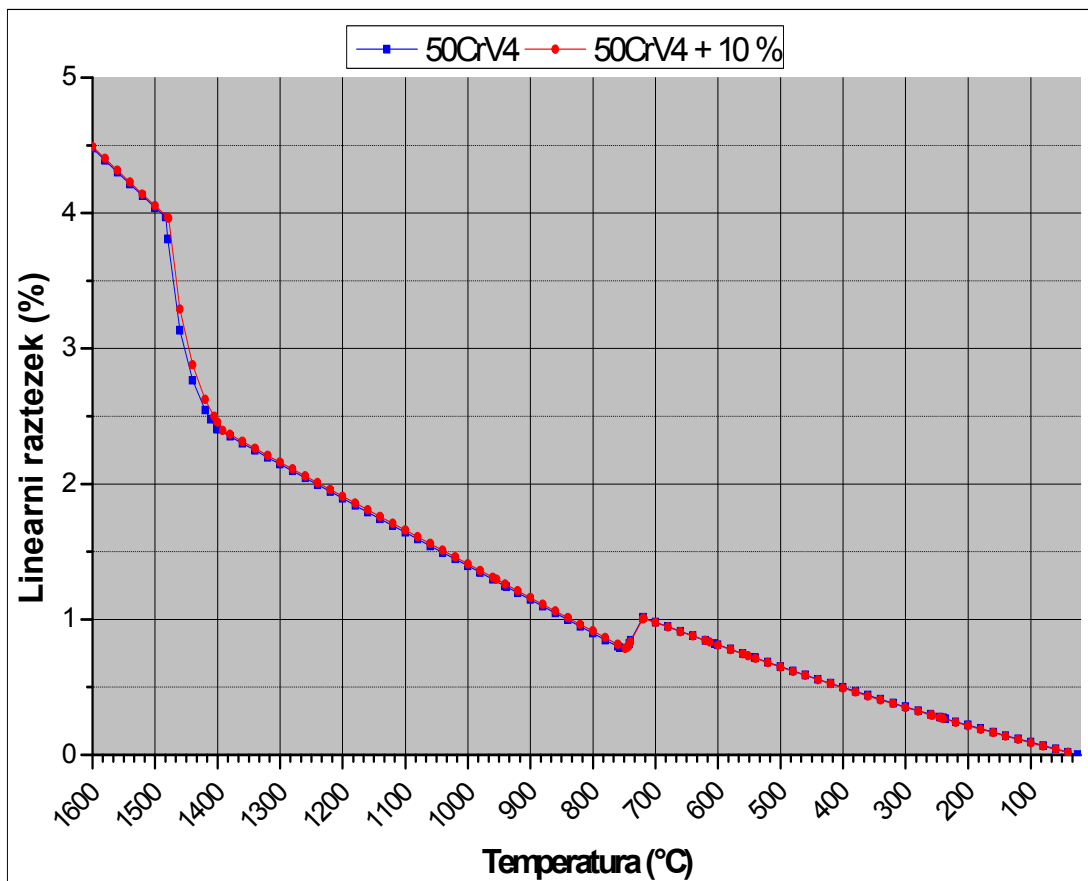
Jekli imata toplotno prevodnost skoraj enakovredno od začetka do konca ohlajanja. Na koncu procesa se vrednosti nekoliko razlikujejo in jeklo 50CrV4 doseže 45,73 W/mK, jeklo 50CrV4 + 10 % pa vrednost 44,83 W/mK. To lahko vidimo na sliki 31.



Slika 31: Primerjava toplotne prevodnosti med jekli 50CrV4 in 50CrV4 + 10 %

8.1.4 Primerjava linearnega raztezka

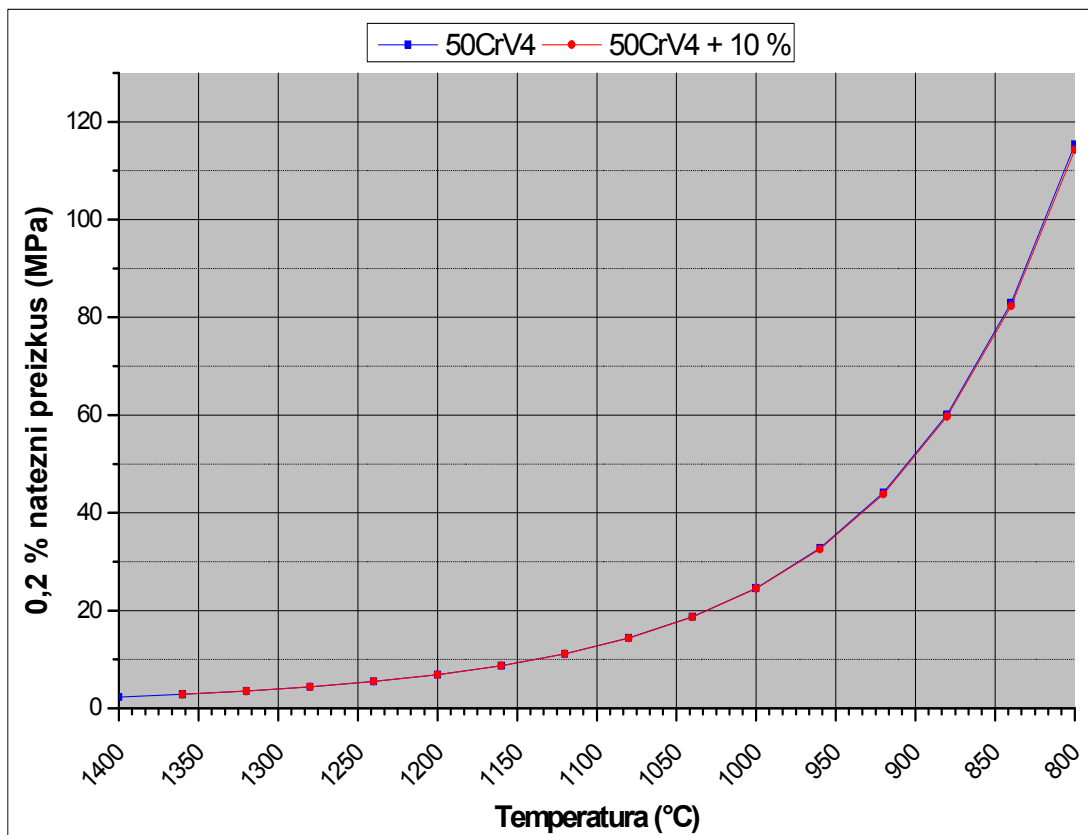
Jeklo 50CrV4 doseže pri 1600 °C linearni raztezek 4,48 %, jeklo 50CrV4 + 10 % pa doseže pri isti temperaturi 4,49 %. Pri temperaturi 1480 °C vrednosti obeh jekel sunkovito padeta do temperature 1400 °C in dosežeta skoraj iste vrednosti. Nato odstotek linearnega raztezka pri obeh jeklih enakomerno pada do temperature 760 °C, kjer vrednosti obeh jekel vzporedno poskočijo. Nato enakomerno padajo z minimalnimi razlikami do vrednosti linearnega raztezka 0 %. Podatke je možno razbrati iz slike 32.



Slika 32: Primerjava linearnega raztezka med jekli 50CrV4 in 50CrV4 + 10 %

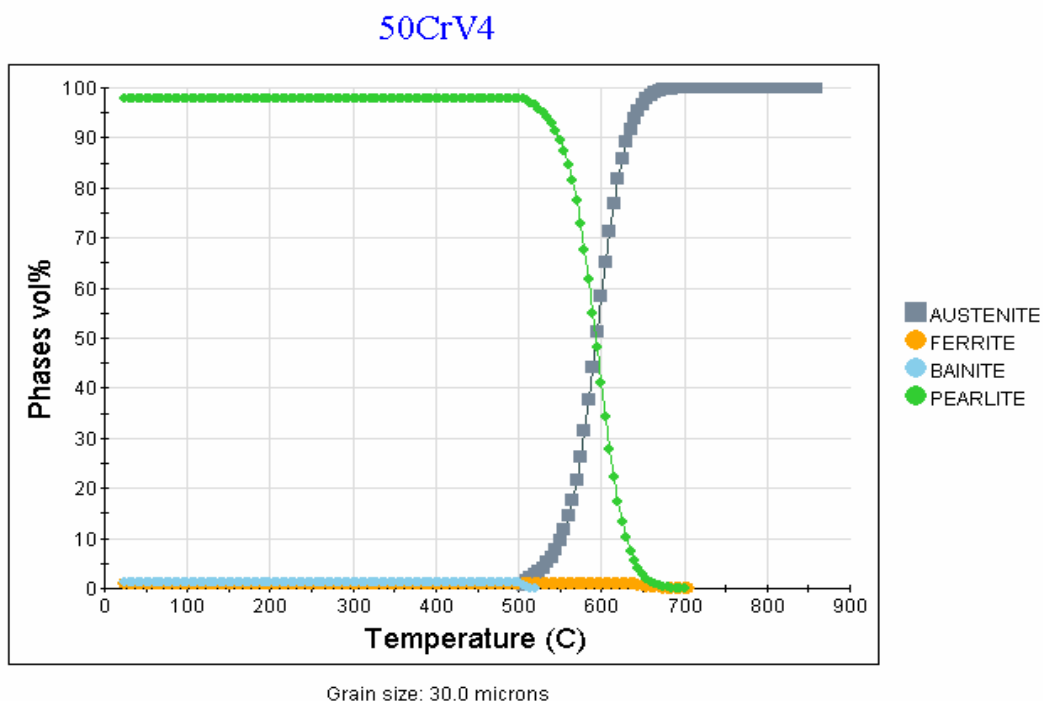
8.1.5 0,2 % natezni preizkus pri visoki temperaturi

Iz slike 33 je razvidno, da med jekli 50CrV4 in 50CrV4 + 10 % skoraj ni razlike. Jeklo 50CrV4 ima na začetku pri temperaturi 1360 °C vrednost 2,83 MPa, pri temperaturi 800 °C pa vrednost 115,37 MPa. Jeklo 50CrV4 + 10 % pa ima na začetku pri enaki temperaturi vrednost 2,84 MPa, na koncu pa 114,3 MPa. Razlike so minimalne.

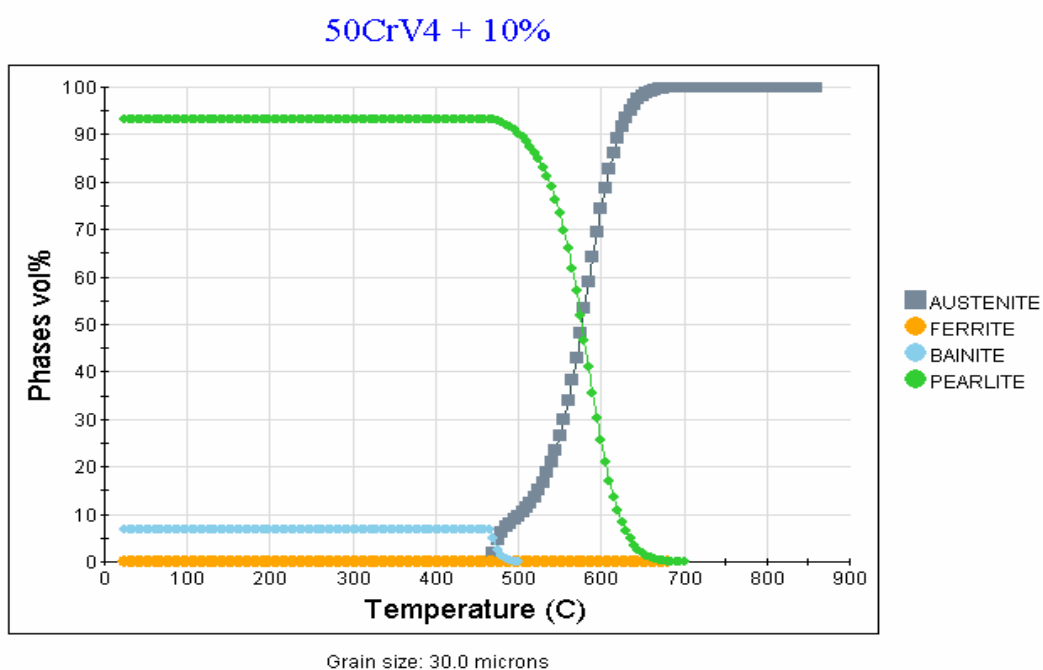


Slika 33: Primerjava 0,2 % nateznega preizkusa pri visoki temperaturi med jekli 50CrV4 in 50CrV4 + 10 %

8.2 Primerjava snovnih lastnosti jekel 50CrV4 in 50CrV4 + 10 % po kaljenju



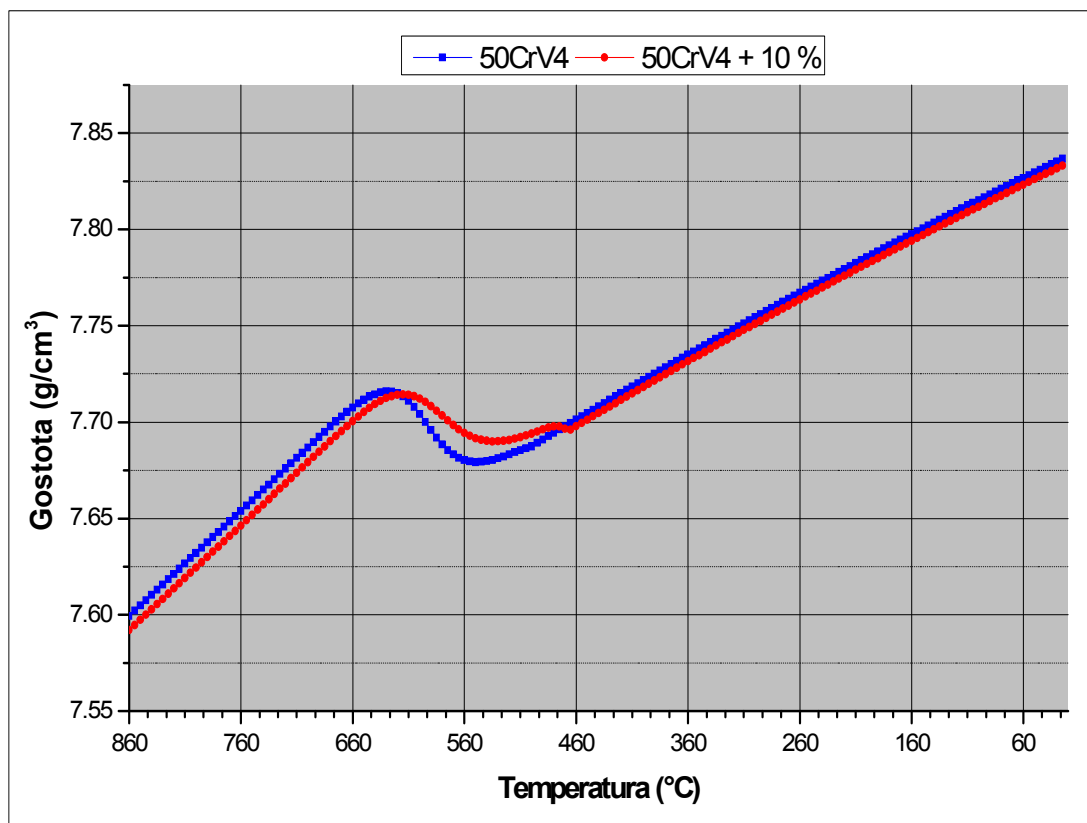
Slika 34: Mikrostrukturne faze jekla 50CrV4 po kaljenju



Slika 35: Mikrostrukturne faze jekla 50CrV4 + 10 % po kaljenju

Na slikah 34 in 35 je razvidno, da se mikrostrukturne faze med kaljenjem bistveno ne razlikujejo. Opazimo lahko, da jeklo 50CrV4 + 10 % vsebuje več bainita kot jeklo 50CrV4. Avstenit se pri obeh jeklih skoraj istočasno začne spreminjati v druge strukture, sledi pa se izgubijo na različnih točkah. V jeklu 50CrV4 je prisoten do temperature 505 °C, jeklu 50CrV4 + 10 % pa do 470 °C. Ferit se v jeklu 50CrV4 pojavi pri 705 °C, narašča do 640 °C, kjer doseže 0,87 % vrednost. Pri jeklu 50CrV4 + 10 % pa se pojavi pri temperaturi 680 °C, narašča do temperature 630 °C, kjer doseže vrednost 0,12 %. Ferit ostane v obeh jeklih konstanten do ohladitve na 25 °C. Perlit se pri obeh jeklih pojavi pri temperaturi 700 °C, z razliko da pri jeklu 50CrV4 raste do temperature 505 °C in doseže 97,87 %, pri jeklu 50CrV4 + 10 % pa narašča do temperature 470 °C in vrednosti 93,1 %. Bainit se v jeklu 50CrV4 + 10 % pojavi pri temperaturi 500 °C in hitro naraste do temperature 640 °C in vrednost 6,8 %, kjer ostane do popolne ohladitve na 25 °C. Jeklo 50CrV4 pa tvori bainit pri 520 °C, nato sunkovito narašča do 500 °C in 1,37 % vrednosti, kjer ostane do ohladitve na sobno temperaturo.

8.2.1 Primerjava gostote po kaljenju



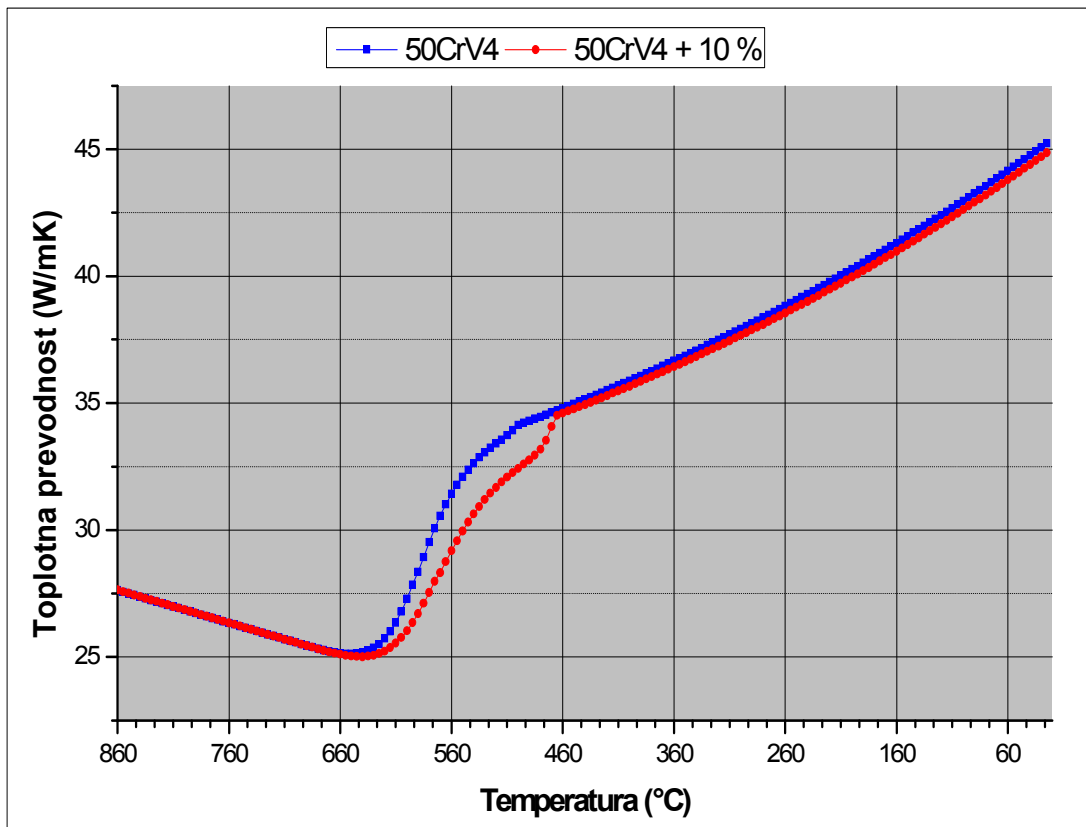
Slika 36: Primerjava gostote jekel 50CrV4 in 50CrV4 + 10 %

Na sliki 36 je razvidno, da se vrednosti jekel že na začetku rahlo razlikujejo. Razlike postanejo večje med temperaturo 653 in 465 °C, ko potekajo transformacije mikrostrukture jekel. Nato se vrednosti spet skoraj izenačijo in na koncu pri 25 °C jeklo 50CrV4 doseže gostoto $7,83664 \text{ g/cm}^3$, jeklo 50CrV4 + 10 % pa vrednost $7,833088 \text{ g/cm}^3$.

8.2.2 Primerjava toplotne prevodnosti po kaljenju

Primerjava toplotne prevodnosti po kaljenju med jekli 50CrV4 in 50CrV4 +10 % je razvidna na sliki 37. Na začetku se vrednosti obeh jekel skoraj ne razlikujeta. Razlike se spet začnejo med (620 in 460 °C) mikrostrukturno transformacijo. Jeklo 50CrV4 + 10 % počasneje veča toplotno prevodnost, medtem ko jeklo 50CrV4 najprej

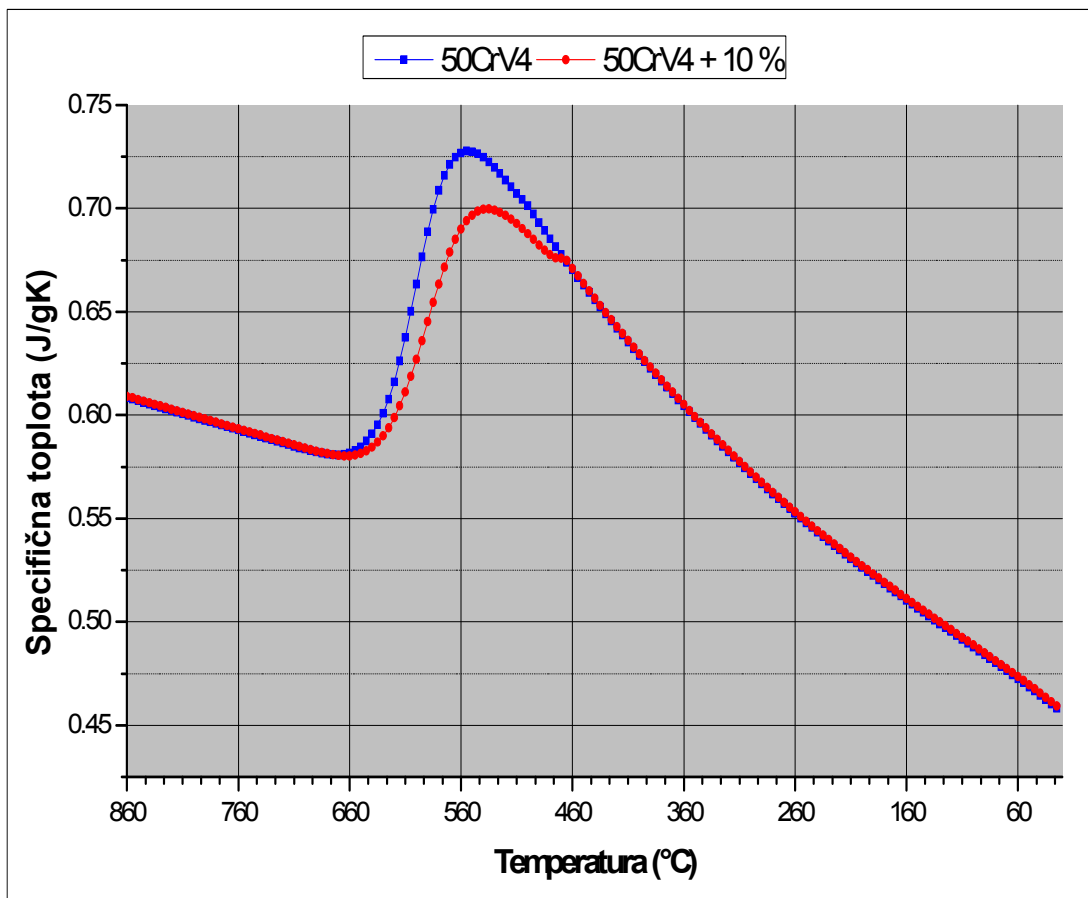
sunkoviteje naraste, nato pa zopet počasneje. Na temperaturi 460 °C se vrednosti jekel spet nekoliko zblížajo, vendar se jeklu 50CrV4 + 10 % toplotna prevodnost rahlo hitreje viša, tako da na temperaturi 25 °C doseže vrednost 44,86 W/mK, jeklo 50CrV4 pa 45,23 W/mK.



Slika 37: Primerjava toplotne prevodnosti med jekli 50CrV4 in 50CrV4 + 10 %

8.2.3 Primerjava specifične toplote po kaljenju

Na sliki 38 se vrednosti specifične toplote med jekli bistveno ne razlikujeta. Najbolj očitne razlike nastajajo v fazi spreminjanja avstenita, nato se vrednosti vrnejo na skoraj iste parametre. Na koncu ohlajanja ima jeklo 50CrV4 vrednost specifične toplote 0,458184 J/gK, jeklo 50CrV4 + 10 % pa 0,459318 J/gK. Opaziti je minimalno razliko.

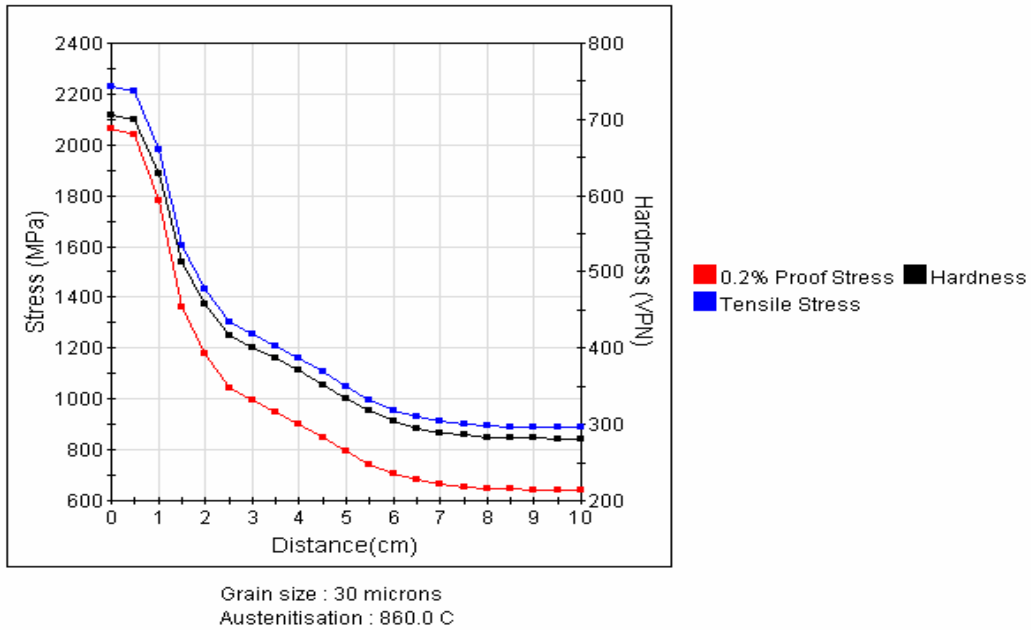


Slika 38: Primerjava specifične toplote po kaljenju med jekli 50CrV4 in 50CrV4 + 10 %

8.2.4 Jominyjev preizkus kaljivosti

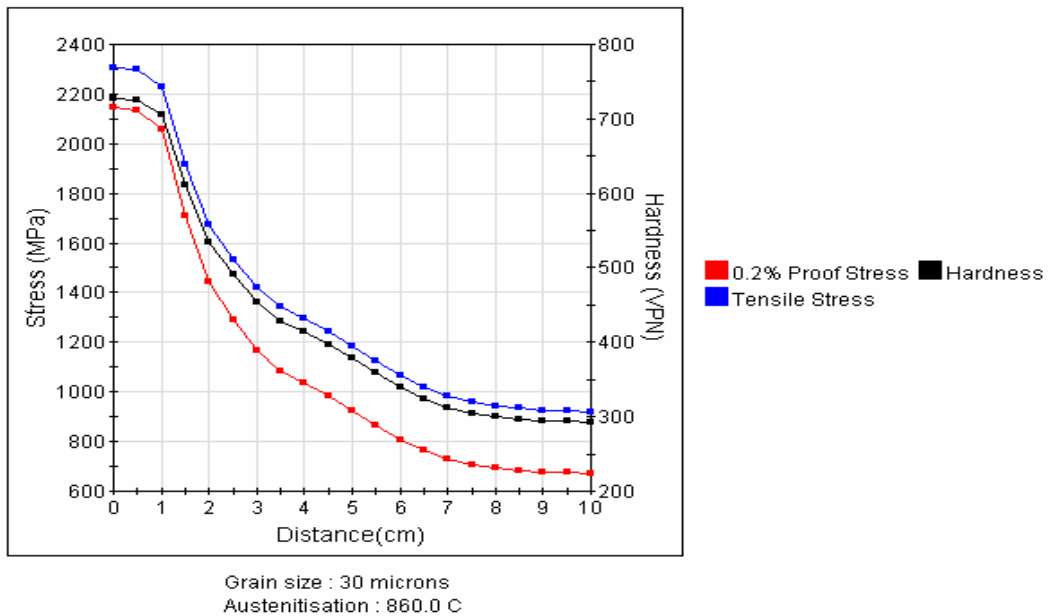
Na slikah 39 in 40 lahko primerjamo trdote obeh jekel. Razvidno je, da se 0,2 % natezni preizkus, natezna trdnost in trdota razlikujejo največ na začetku pri razdalji 0 cm. Na razdalji 10 cm so razlike minimalne.

50CrV4



Slika 39: Diagram Jominyjevega preizkusa kaljivosti za jeklo 50CrV4

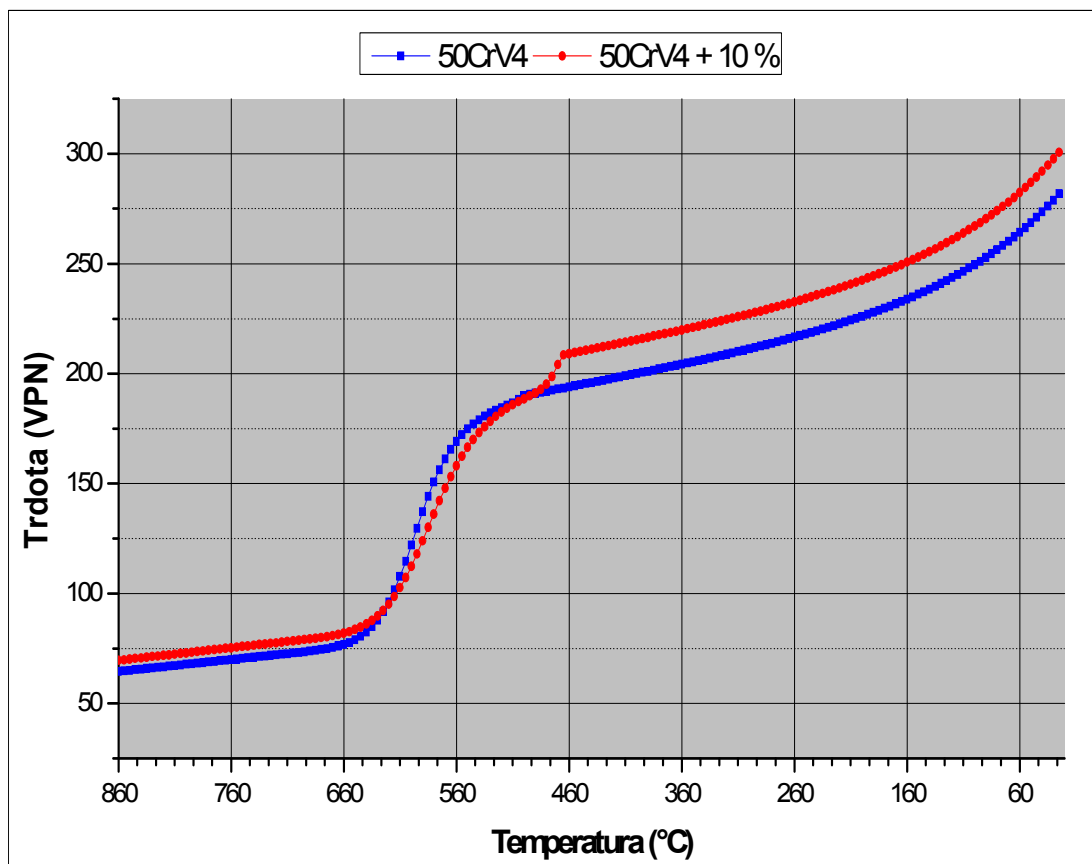
50CrV4 + 10%



Slika 40: Diagram Jominyjevega preizkusa kaljivosti za jeklo 50CrV4 + 10 %

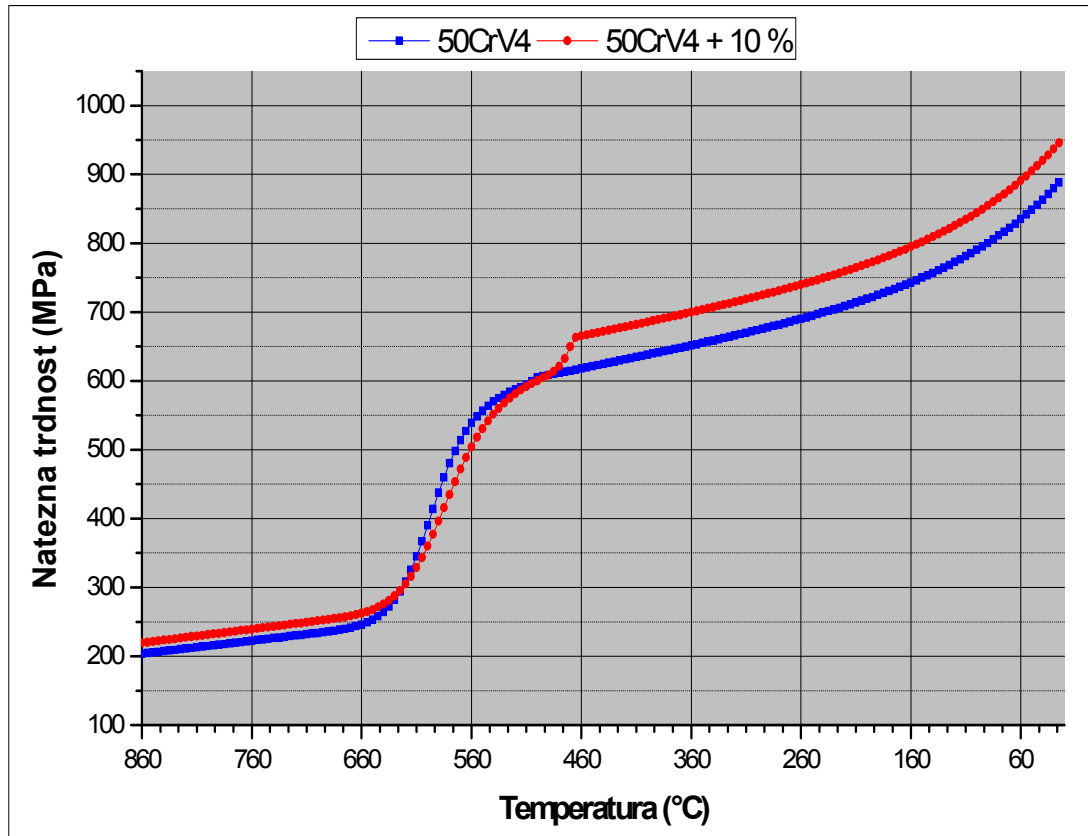
8.2.5 Primerjave trdote po kaljenju

Iz slike 41 lahko ugotovimo, da so začetne vrednosti obeh jekel pri temperaturi 860 °C skoraj enakovredne. Tudi na začetku avstenitne transformacije sta jekli na podobnih vrednostih. Razlika nastane, ko jeklo 50CrV4 +10 % pri koncu avstenitne transformacije hitreje poveča trdoto. Tako doseže pri 25 °C trdoto 300,69 VPN, jeklo 50CrV4 pa vrednost 281,841 VPN.



Slika 41: Primerjava trdote po kaljenju med jekli 50CrV4 in 50CrV4 + 10 %

8.2.6 Primerjava natezne trdnosti po kaljenju

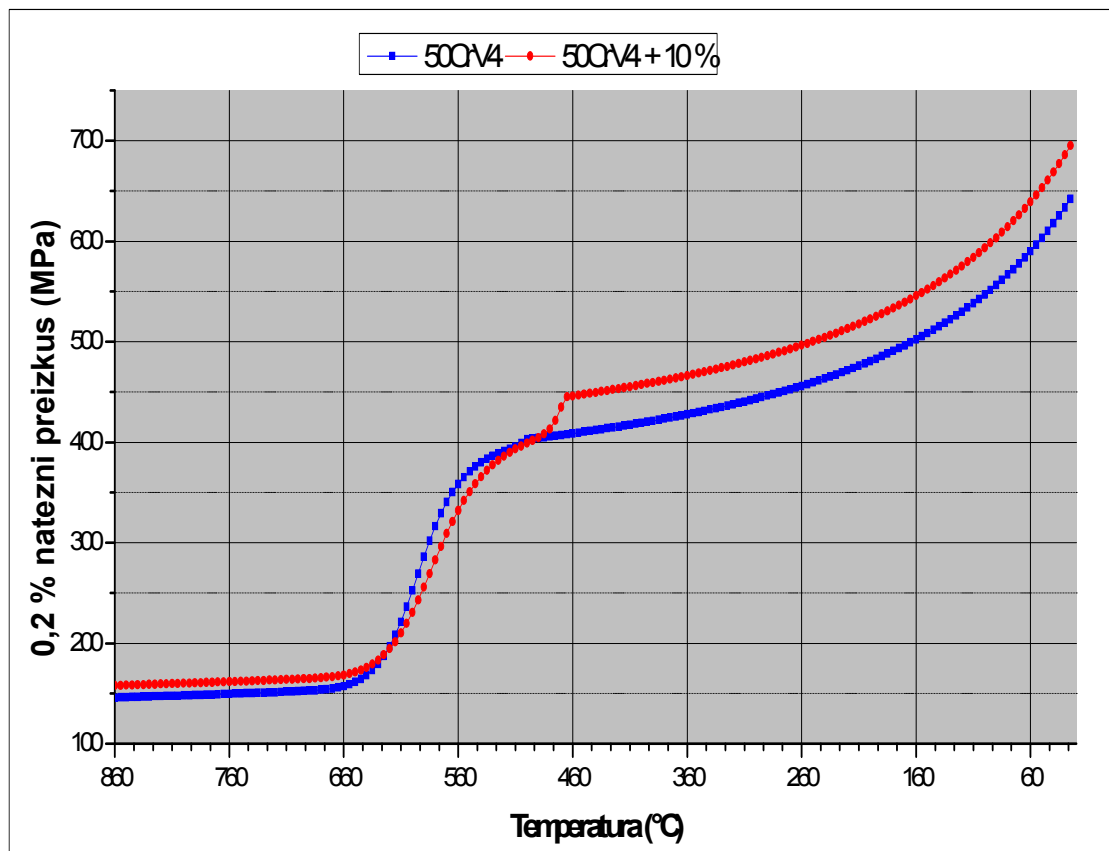


Slika 42: Primerjave natezne trdnosti jekel 50CrV4 in 50CrV4 + 10 %

Tudi pri natezni trdnosti je iz slike 42 razviden pričetek večjih razlik, po začetnih podobnih vrednostih pri avstenitni transformaciji. Kot pri trdoti, tudi tu jeklo 50CrV4 + 10 % hitreje naraste in pri sobni temperaturi 25 °C doseže natezno trdnost 946,02 MPa, jeklo 50CrV4 pa 888,036 MPa.

8.2.7 Primerjava 0,2 % nateznega preizkusa po kaljenju

Slika 43 prikazuje podobne lastnosti kot sliki trdote in natezne trdnosti. Pri 680 °C imata jekli podobne vrednosti. Tudi pri nadaljnjem ohlajanju imata podobne lastnosti, vendar do točke avstenitne transformacije, ko jeklo 50CrV4 + 10 % spet hitreje naraste. Na koncu ima 0,2 % natezno trdnost 694,98 MPa, jeklo 50CrV4 pa 642,16 MPa.



Slika 43: Primerjava 0,2 % nateznega preizkusa med jekli 50CrV4 in 50CrV4 + 10 %

9 PRIMERJAVA TRDOT JEKEL 50CrV4, 50CrV4-V, 50CrV4-Cr IN 50CrV4-Mn

Najprej smo primerjali snovne lastnosti jekli 50CrV4 in 51CrMoV4/51CrMoV4, nato jekli 50CrV4 in 50CrV4 + 10 %. Tokrat pa bomo primerjali trdote jekel 50CrV4, 50CrV4-V, 50CrV4-Cr in 50CrV4-Mn. Dodana oznaka k začetnemu imenu je element v sestavi jekla. To označuje, da smo omenjen element v imenu jekla, povečali pri sestavi za 10 %.

Sestave znašajo:

50CrV4: Al = 0,02 %; C = 0,51 %; Cr = 1,05 %; Cu = 0,125 %; Mn = 0,9 %; Mo = 0,025 %; Ni = 0,1 %; Si = 0,275 %; V = 0,155 %; P = 0,0125 %; S = 0,0275 %; Sn = 0,0125 %.

50CrV4-V: Al = 0,02 %; C = 0,51 %; Cr = 1,05 %; Cu = 0,125 %; Mn = 0,9 %; Mo = 0,025 %; Ni = 0,1 %; Si = 0,275 %; **V = 0,1705 %**; P = 0,0125 %; S = 0,0275 %; Sn = 0,0125 %.

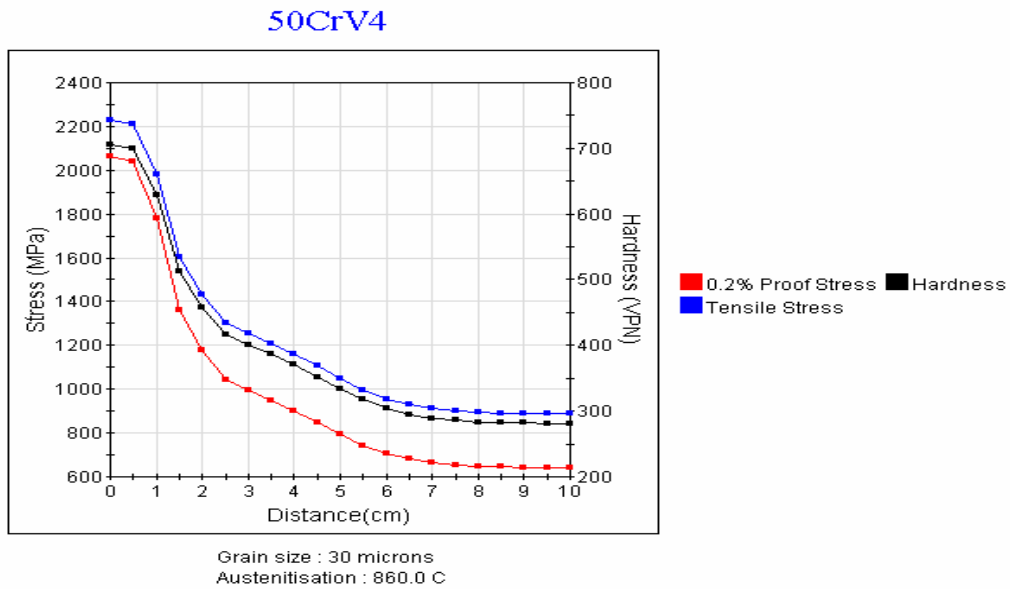
50CrV4-Cr: Al = 0,02 %; C = 0,51 %; **Cr = 1,155 %**; Cu = 0,125%; Mn = 0,9 %; Mo = 0,025 %; Ni = 0,1 %; Si = 0,275 %; V = 0,155 %; P = 0,0125 %; S = 0,0275 %; Sn = 0,0125 %.

50CrV4-Mn: Al = 0,02 %; C = 0,51%; Cr = 1,05 %; Cu = 0,125 %; **Mn = 0,99 %**; Mo = 0,025 %; Ni = 0,1 %; Si = 0,275 %; V = 0,155 %; P = 0,0125 %; S = 0,0275 %; Sn = 0,0125 %.

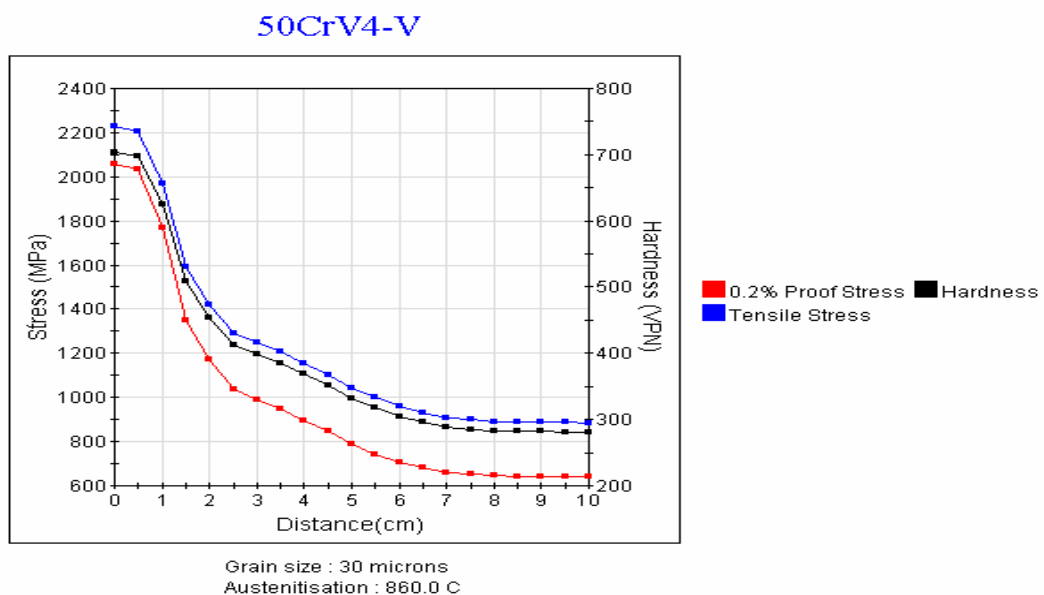
Tokrat primerjamo samo trdote, ker smo pri prejšnjih primerjavah opazili, da druge snovne lastnosti skorajda ne nihajo. Največje razlike se kažejo pri trdotah, še posebej po kaljenju.

9.1 Primerjava trdot jekel 50CrV4 in 50CrV4-V

9.1.1 Primerjava Jominyjevega preizkusa kaljivosti



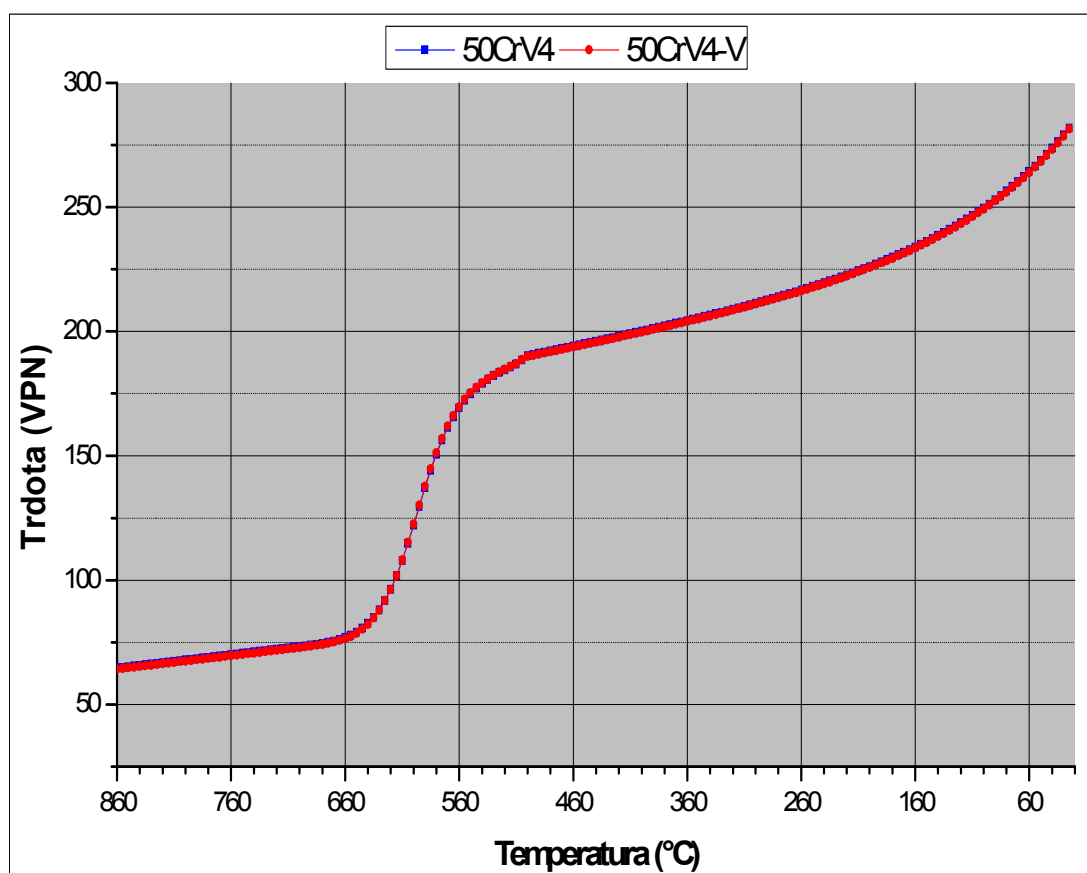
Slika 44: Diagram Jominyjevega preizkusa kaljivosti za jeklo 50CrV4



Slika 45: Diagram Jominyjevega preizkusa kaljivosti za jeklo 50CrV4-V

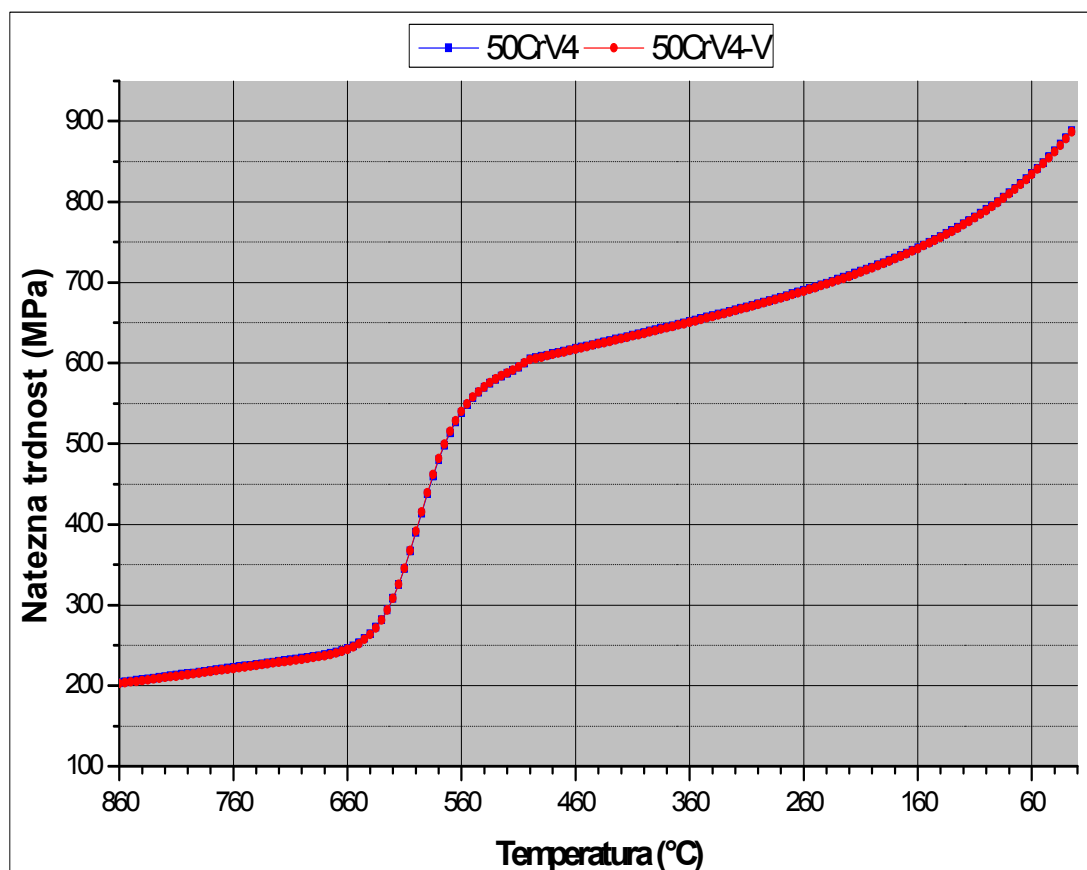
Vrednosti na začetku in na koncu se pri obeh jeklih minimalno razlikujeta. Pri jeklu 50CrV4 je trdota na 0,0010 cm 705,91 VPN in na 10 cm pa 281,29 VPN. Natezna trdnost je na začetku 2231,74 MPa, na koncu pa 886,35 MPa. 0,2 % preizkusu nateznosti pa 2061,57 MPa in na razdalji 10 cm 640,65 MPa. Pri jeklu 50CrV4-V so vrednosti rahlo nižje. Tako znaša trdota na 0,0010 cm 704,17 VPN, na 10 cm pa 281,11 VPN, natezna trdnost na začetku je 2225,97 MPa, na koncu pa 885,97 MPa, 0,2 % preizkus nateznosti je na začetku 2055,12 MPa, na koncu pa 640,14 MPa. Opisane podatke lahko razberemo iz slik 44 in 45.

9.1.2 Primerjava trdot po kaljenju



Slika 46: Primerjava trdote po kaljenju jekel 50CrV4 in 50CrV4-V

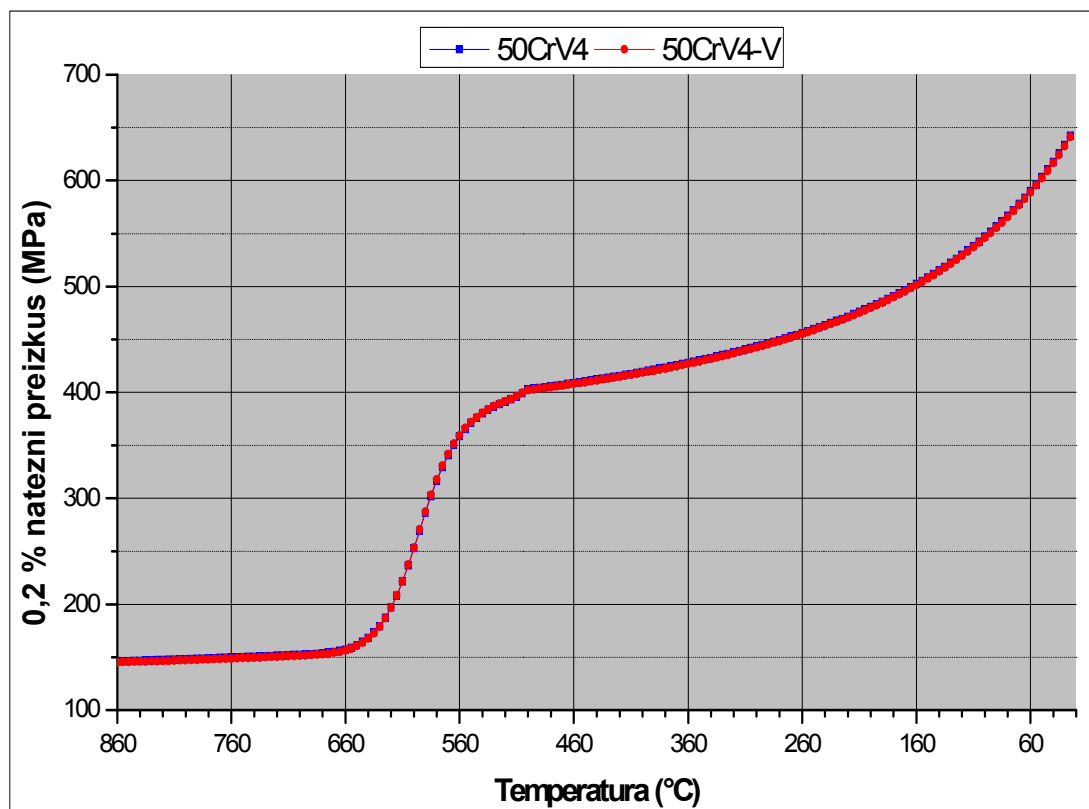
Trdota jekel pri kaljenju se skozi celoten proces kaljenja (kot je razvidno iz slike 46) skoraj ne razlikuje. Razlika je skoraj konstantna, s končnimi vrednostmi pri 25 °C pri jeklu 50CrV4 281,84 VPN, pri jeklu 50CrV4-V pa 281,46 VPN.



Slika 47: Primerjava natezne trdnosti pri jeklih 50CrV4 in 50CrV4-V po kaljenju

Na sliki 47, ki prikazuje natezno trdnost obeh jekel, ni videti večjih sprememb. Jeklo 50CrV4 ima natezno trdnost pri sobni temperaturi 888,04 MPa, pri jeklu 50CrV4-V pa znaša 886,87 MPa.

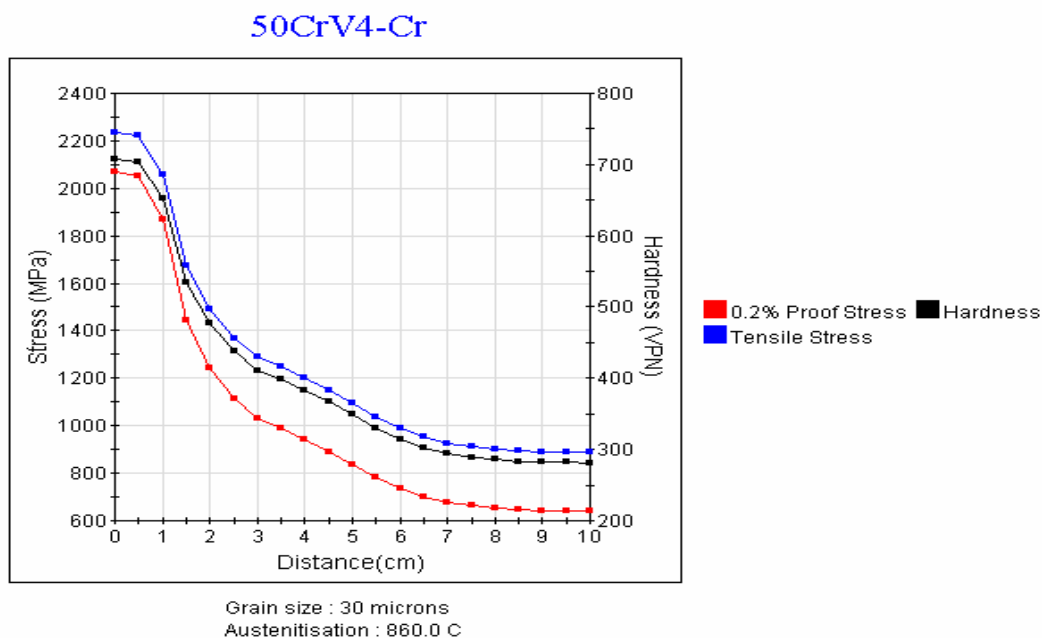
Tudi na sliki 48, ki prikazuje primerjavo 0,2 % nateznega preizkusa med jekli 50CrV4 in 50CrV4-V, ni opaziti nobenih večjih razlik. Jeklo 50CrV4 ima na koncu ohlajanja pri 25 °C vrednost 642,16 MPa, jeklo 50CrV4-V pa 641,11 MPa.



Slika 48: Primerjava 0,2 % nateznega preizkusa pri jeklih 50CrV4 in 50CrV4-V

9.2 Primerjava jekla 50CrV4 in jekla 50CrV4-Cr

9.2.1 Primerjava Jominyjevega preizkusa kaljivosti

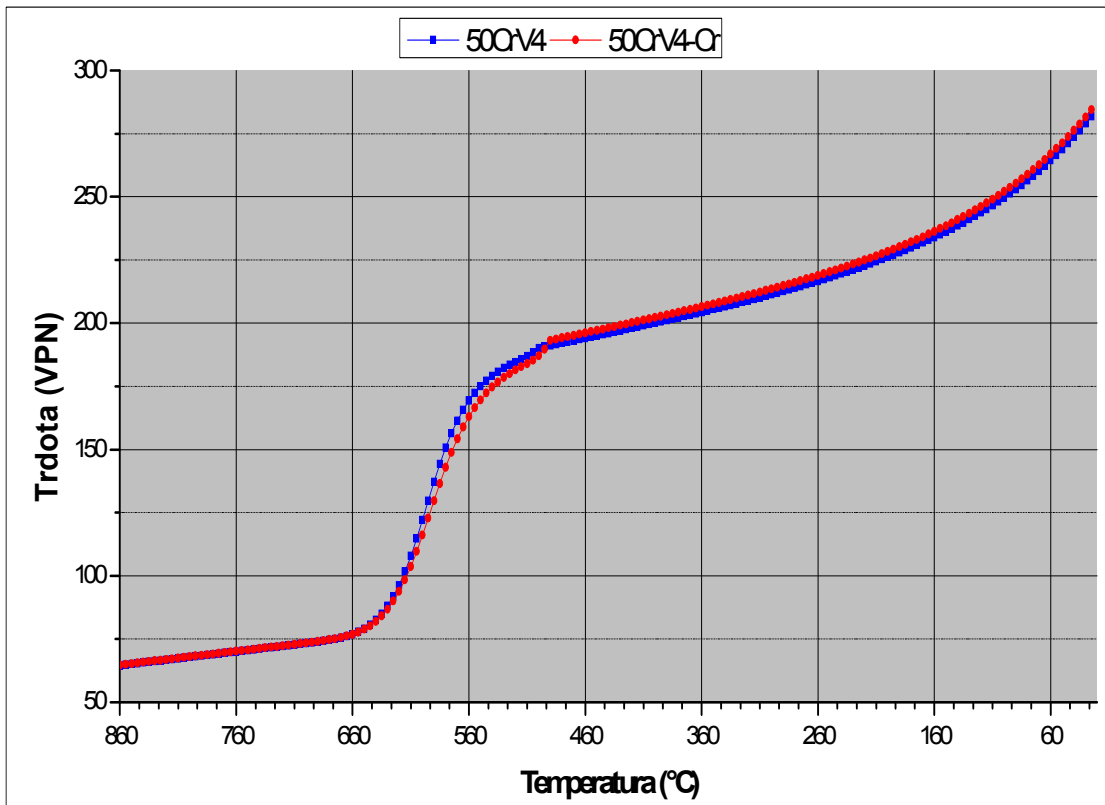


Slika 49: Diagram Jominyjevega preizkusa kaljivosti za jeklo 50CrV4-Cr

Na sliki 49 so prikazane trdote jekla 50CrV4-Cr, na sliki 44 pa vrednosti jekla 50CrV4. Tudi v tem primeru ni opaziti večjih razlik. Vrednosti jekla 50CrV4 smo že prej omenili. Vrednosti jekla 50CrV4-Cr pa so naslednje: trdota pri 0,0010 cm je 707,29 VPN, pri 10 cm pa 281,45 VPN, natezna trdnost je na začetku 2236,29 MPa na koncu pa 886,96 MPa, 0,2% natezni preizkus znaša na začetku 2066,65 MPa, na koncu pa 641,16 MPa. Te vrednosti kažejo na malo večjo trdnost jekla 50CrV4-Cr.

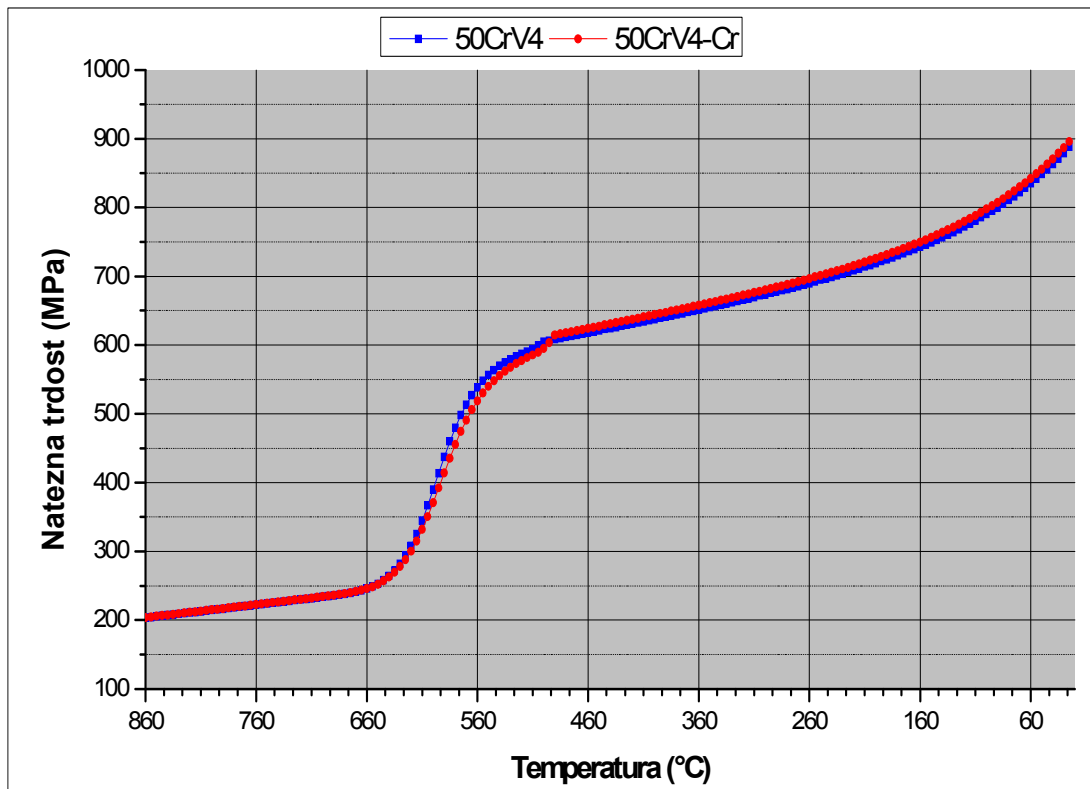
9.2.2 Primerjava trdot po kaljenju

Tudi slika 50 nam prikazuje skoraj enakovredne vrednosti, le z malo večjimi razmiki. Razlike so bolj očitne kot pri prejšnjem primeru, tako da na koncu pri 25 °C ima jeklo 50CrV4-Cr vrednost 284,44 VPN, jeklo 50CrV4 pa 281,81 VPN.



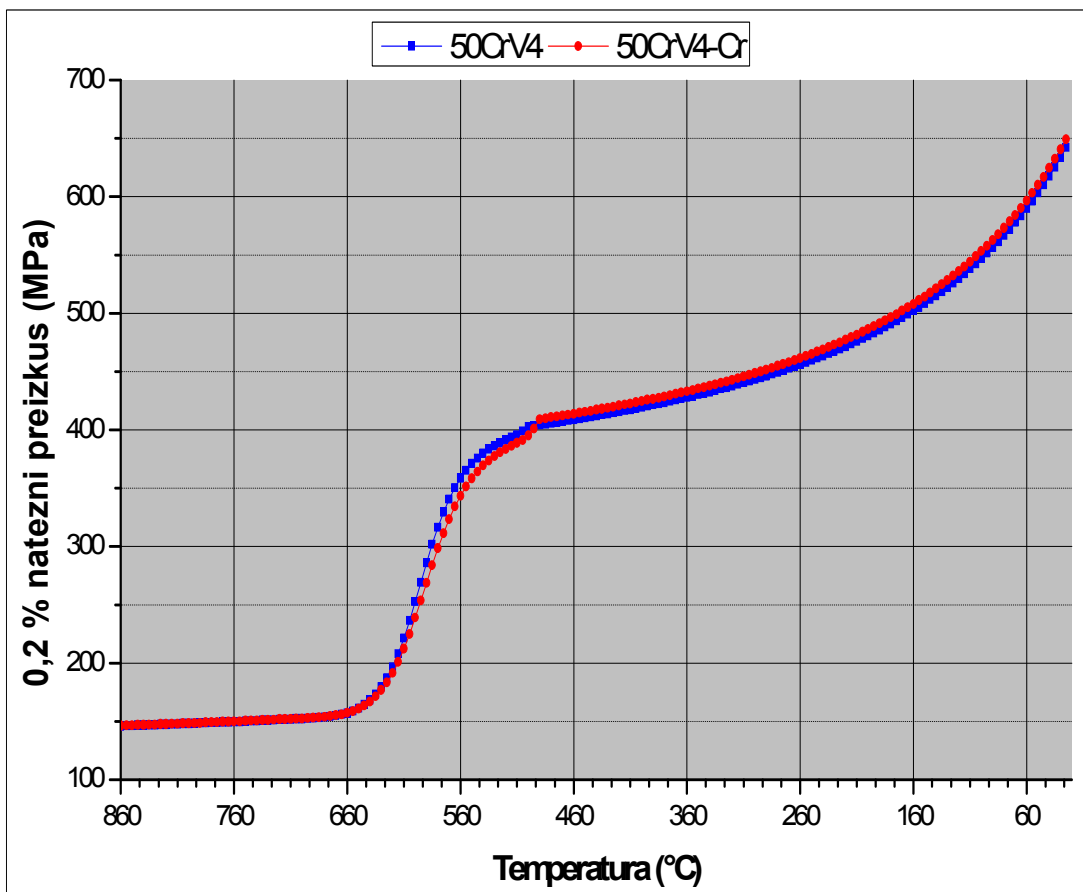
Slika 50: Primerjava trdote med jekli 50CrV4 in 50CrV4-Cr po kaljenju

Podoben situacijo kaže tudi slika 51. Vrednosti so skoraj enakovredne z rahlim prevladovanjem jekla 50CrV4-Cr. Pri temperaturi 25 °C doseže natezno trdnost 896,02 MPa, jeklo 50CrV4 pa 888,04 MPa.



Slika 51: Primerjava natezne trdnosti jekel 50CrV4 in 50CrV4-Cr po kaljenju

Tudi 0,2 % natezni preizkus, ki je prikazan na sliki 52, ne daje drugačnih izidov. Jeklo 50CrV4-Cr malenkostno prevladuje z vrednostjo pri 25 °C 849,36 MPa, jeklo 50CrV4 ima vrednost 642,16 MPa.



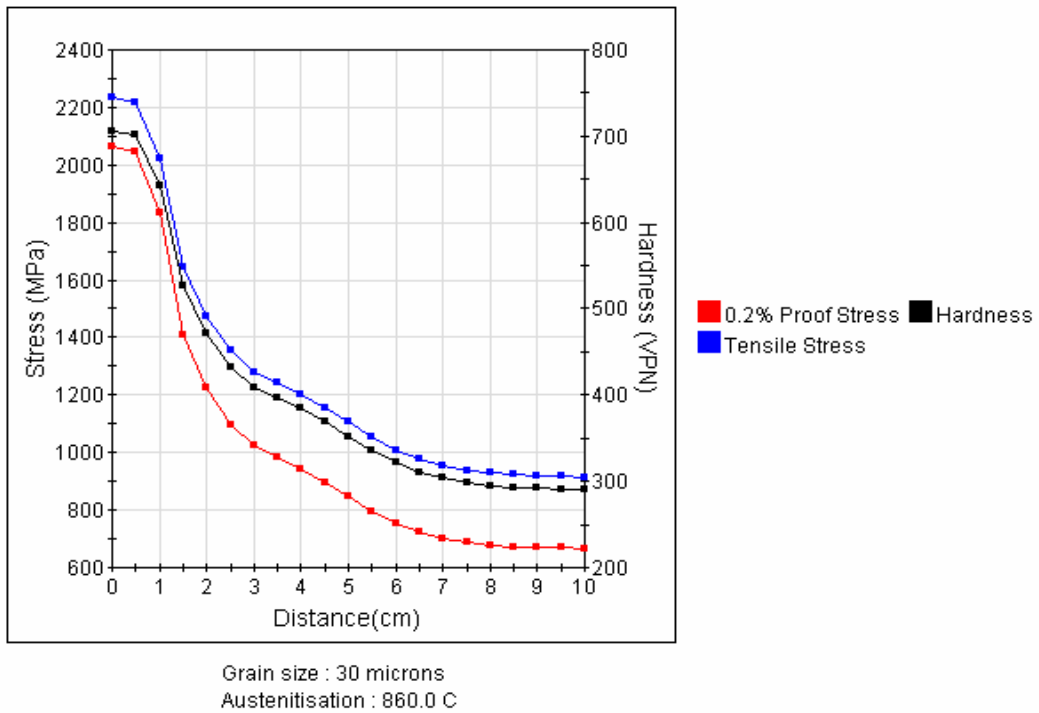
Slika 52: Primerjava 0,2 % nateznega preizkusa med jekli 50CrV4 in 50CrV4-Cr po kaljenju

9.3 Primerjava trdot jekel 50CrV4 in 50CrV4-Mn

9.3.1 Primerjava Jominyjevega preizkusa kaljivosti

Slika 44 na strani 71 nam prikazuje trdote jekla 50CrV4, slika 53 pa trdote jekla 50CrV4-Mn, iz katere je razvidno, da prevladuje jeklo 50CrV4-Mn. Na začetku pri razdalji 0,0010 je trdota 706,56 VPN, natezna trdnost 2233,87 MPa in 0,2 % natezni preizkus pa 2063,95 MPa. V tem primeru se ne bistveno razlikuje od jekla 50CrV4. Pri razdalji 10 cm pa so razlike očitnejše. Trdota znaša 290,65 VPN, natezna trdnost 915,13 in 0,2 % natezni preizkus pa 666,68 MPa. Jeklo 50CrV4-Mn je na večji razdalji bolj vzdržljivo od nasprotne vrste jekla.

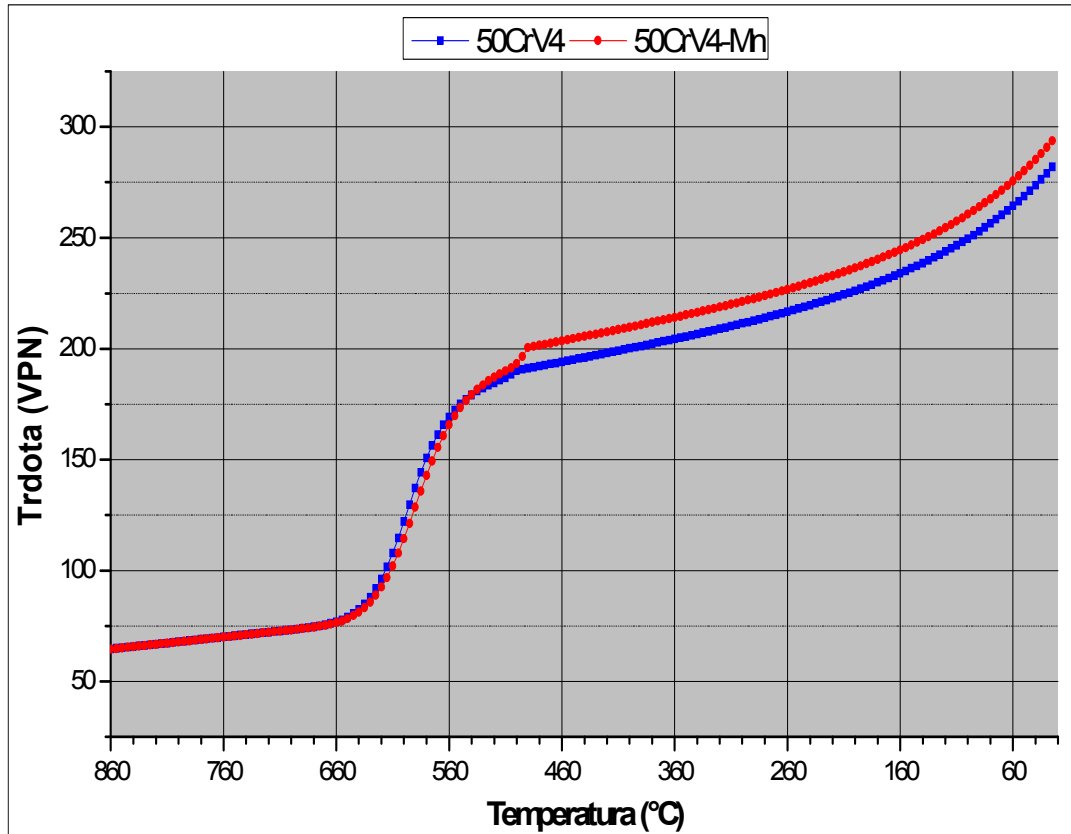
50CrV4-Mn



Slika 53: Diagram Jominyjevega preizkusa kaljivosti za jeklo 50CrV4-Mn

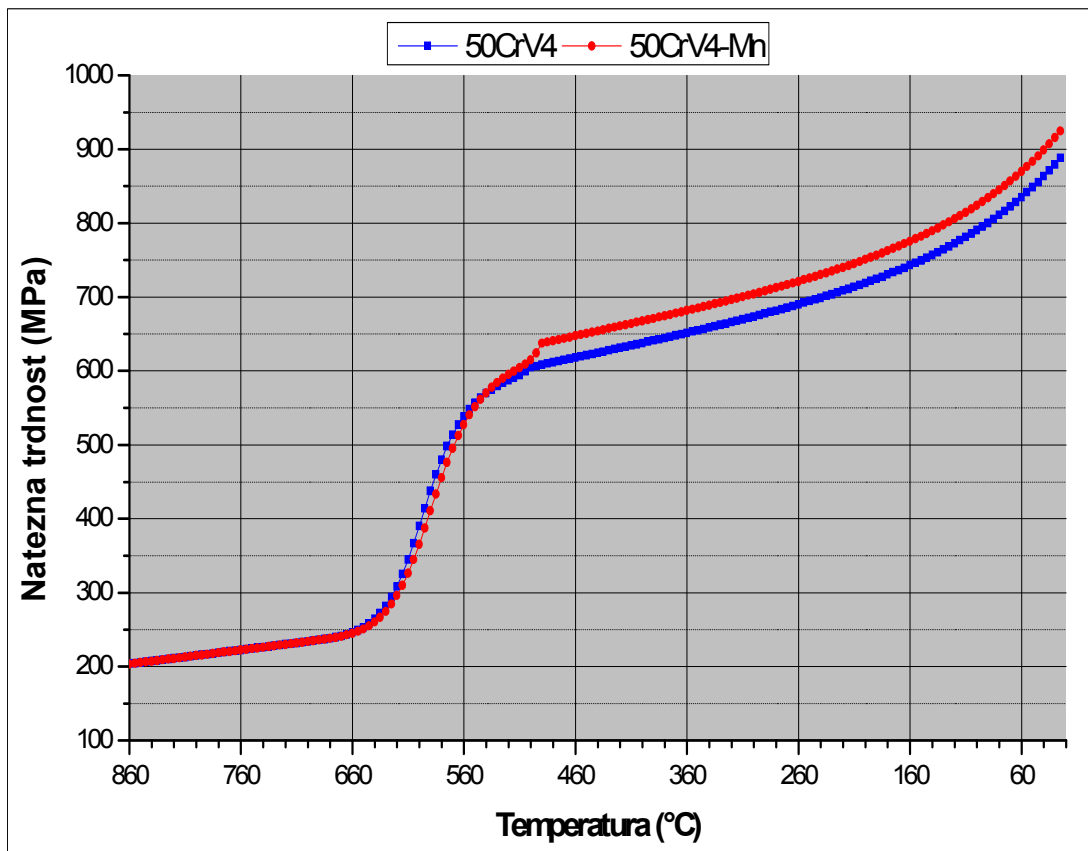
Slika 54 ponuja na ogled prevladujoče vrednosti jekla 50CrV4-Mn, ki znaša na koncu pri 25°C 293,64 VPN, medtem ko jeklo 50CrV4 doseže le 281,84 VPN.

9.3.2 Primerjava trdot po kaljenju



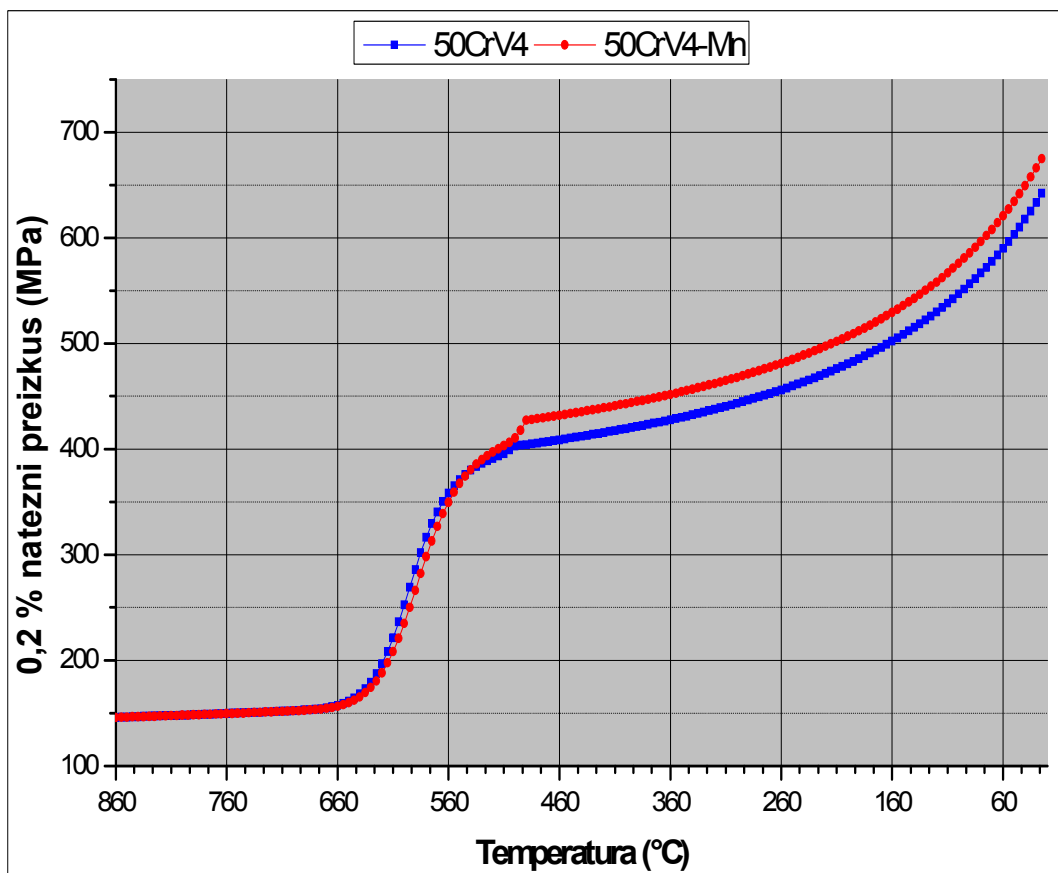
Slika 54: Primerjava trdote jekel 50CrV4 in 50CrV4-Mn po kaljenju

Tudi na sliki 55, ki nam prikazuje natezno trdnost, je razvidno prevladovanje jekla 50CrV4-Mn, ki pri sobni temperaturi doseže 924,32 MPa natezne trdnosti. Jeklo 50CrV4 pa pri isti temperaturi doseže le vrednost 888,04 MPa.



Slika 55: Primerjava natezne trdnosti jekel 50CrV4 in 50CrV4-Mn po kaljenju

Na sliki 56 je prikazan 0,2 % natezni preizkus po kaljenju, ki ga primerjamo med jekli 50CrV4 in 50CrV4-Mn, katero kaže večje vrednosti, in sicer pri 25 °C doseže jeklo 50CrV4-Mn 675,07 MPa, jeklo 50CrV4 pa 642,16 MPa.

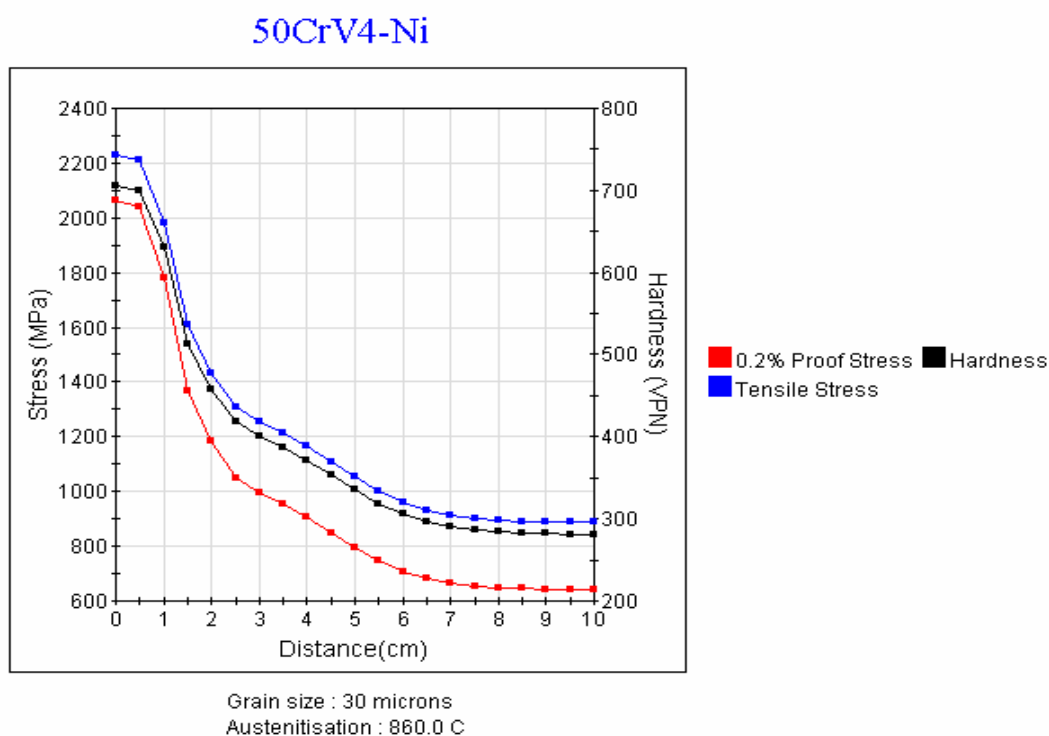


Slika 56: Primerjava 0,2 % nateznega preizkusa med jekli 50CrV4 in 50CrV4-Mn po kaljenju

Na splošno raziskave kažejo, da mangan (Mn) najbolj vpliva na trdoto, natezno trdoto in 0,2 % raztezni preizkus, v primerjavi z elementi, kot sta vanadij (V) in krom (Cr).

9.4 Primerjava trdot jekel 50CrV4 in 50CrV4-Ni

9.4.1 Primerjava Jominyjevega preizkusa kaljivosti

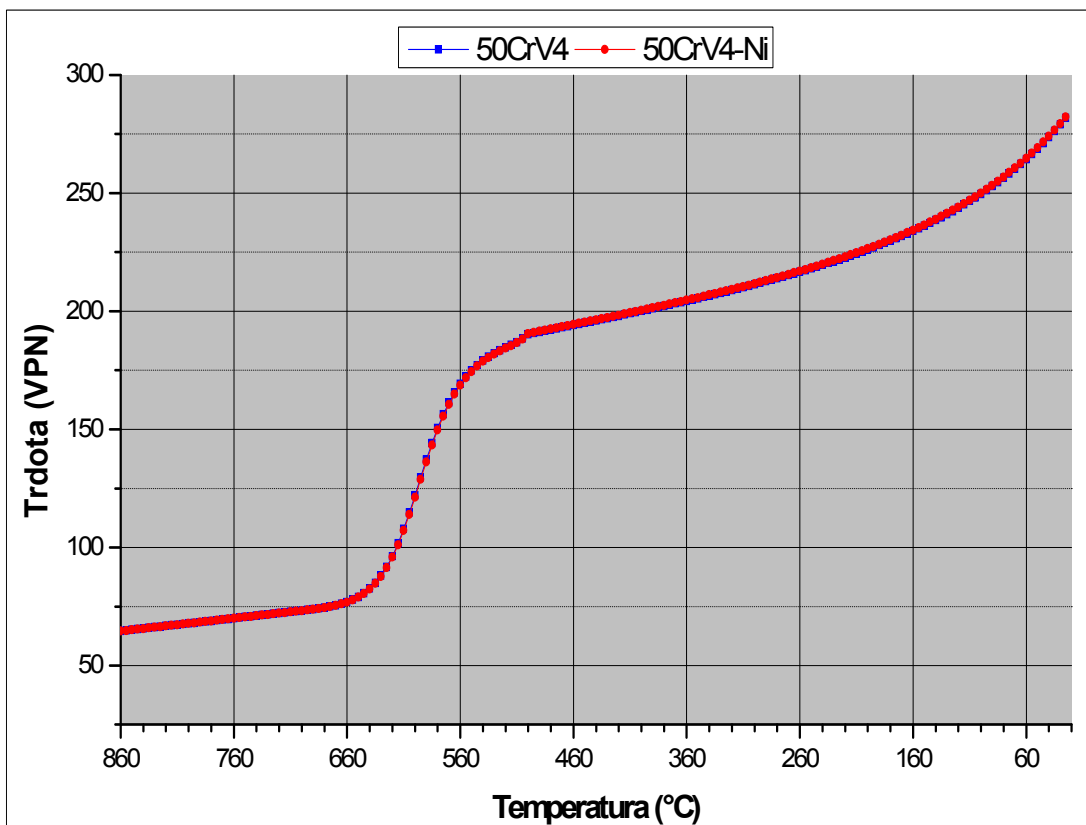


Slika 57: Diagram Jominyjevega preizkusa kaljivosti za jeklo 50CrV4-Ni

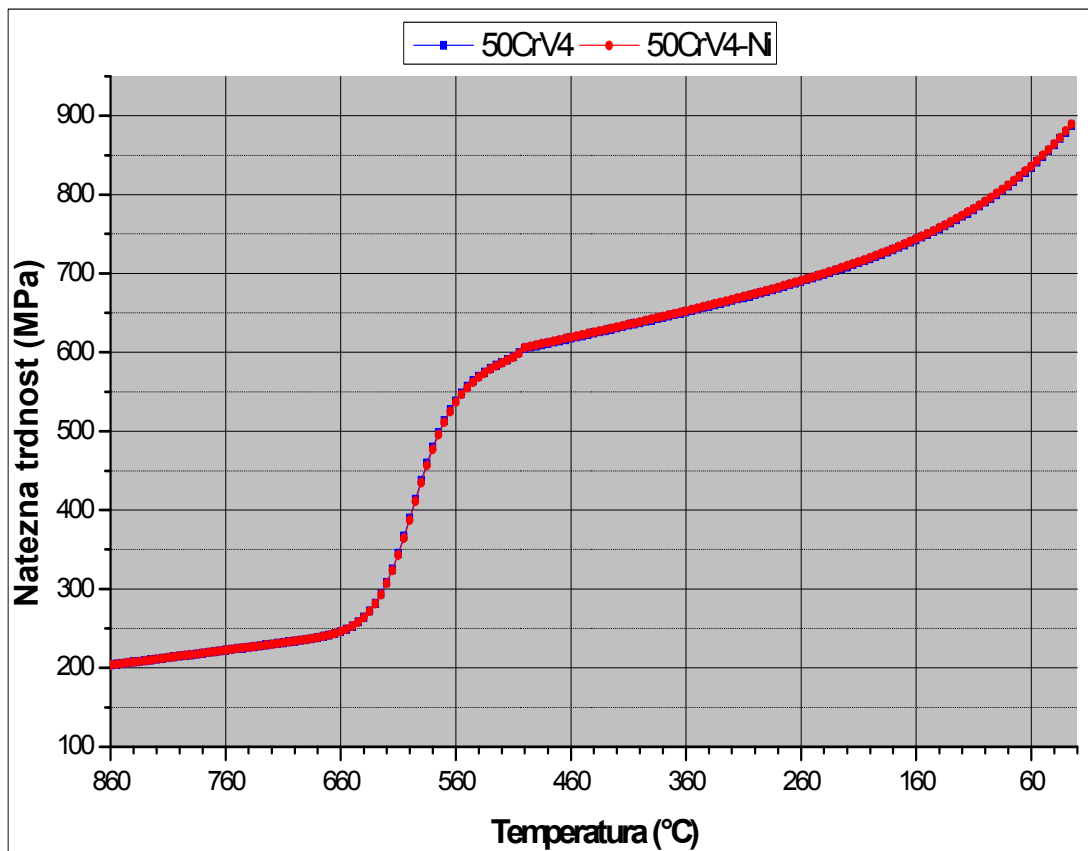
Slika 44 na strani 71 prikazuje trdote jekla 50CrV4, na Sliki 57 pa trdote jekla 50CrV4-Ni. Vrednosti se pri vseh točkah pri jeklih skoraj ne spreminjajo. Povprečna razlika je 0,05 vrednosti, na primer trdota pri jeklu 50CrV4 je na začetku 705,91 VPN, trdota drugega jekla pa 705,87 VPN. Podobna razlika je opazna pri vseh vrednostih.

9.4.2 Primerjava trdot po kaljenju

Slika 58 prikazuje primerjavo trdot omenjenih jekel. Razvidno je, da razlik v vrednosti skoraj ni. Jeklo 50CrV4 ima pri temperaturi 860 °C trdoto 64,578 VPN, jeklo 50CrV4-Ni pa 64,583 VPN. Tudi na koncu je razlika minimalna. Prvo doseže trdnost 281,84 VPN, drugo pa 282,25 VPN .

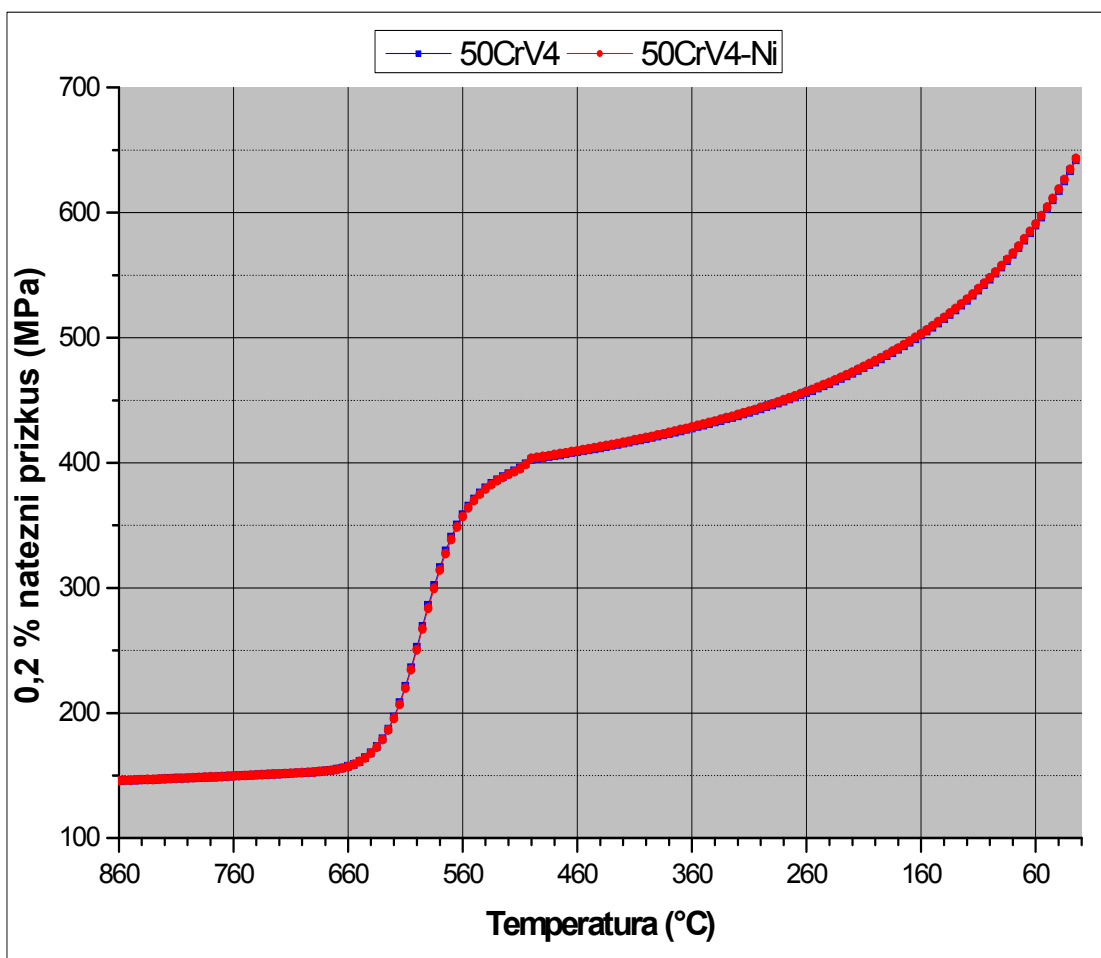


Slika 58: Primerjava trdote jekel 50CrV4 in 50CrV4-Ni po kaljenju



Slika 59: Primerjava natezne trdnosti med jekli 50CrV4 in 50CrV4-Ni po kaljenju

Slika 59 prikazuje podobna razhajanja kot slika 58, ki prikazuje trdoti. Jekli se med potekom ohlajanja minimalno razlikujeta. Jeklo 50CrV4 doseže pri 25 °C natezno trdnost 888,04 MPa, jeklo 50CrV4-Ni pa 889,31 MPa.



Slika 60: Primerjava 0,2 % nateznega preizkusa med jekli 50CrV4 in 50CrV4-Ni po kaljenju

Slika 60 prikazuje primerjavo 0,2 % nateznega preizkusa med jekli 50CrV4 in 50CrV4-Ni. Celoten potek ohlajanja poteka skoraj sinhronizirano med jekli z minimalnimi razlikami. Pri 25 °C pa dosežeta jekli naslednje vrednosti: jeklo 50CrV4 doseže 642,16 MPa, jeklo 50CrV4-Ni pa 643,31 MPa.

10 ZAKLJUČEK

V diplomskem delu smo pregledali načine pridobivanja železa in opisali postopek pridobivanja jekla. Jekla smo razdelili po sestavi, uporabi, načinu pridobivanja, kemični sestavi in opisali glavne lastnosti, zaradi katerih so jekla za človeštvo življenjskega pomena. Sodobna tehnologija in razvoj sta ta proces močno poenostavila in pospešila. Kljub temu ostaja postopek pridobivanja železa in nadaljnje žilavenje železa zahteven in pomemben proces. Z minimalno spremembo oziroma popravkom določene faze tega procesa, se pridobi jeklo z različnimi lastnostmi in karakteristikami. Tako lahko proizvedemo različna jekla z različnimi fizikalnimi, kemijskimi in strukturnimi lastnostmi. Na ta način lahko prilagodimo lastnosti jekla za vsak segment uporabe. Na same lastnosti jekla ne vplivajo samo spremembe pri procesu predelave, ampak tudi spreminjanje sestave jekla. To pomeni, da lastnosti jekel v večini spreminjamo z dodajanjem različnih legirnih elementov. Vsak legirni element ima lastnost, da spremeni lastnosti jekla. Nekateri legirni elementi večajo trdoto jekla, nekateri žilavost, najzanimivejši pa je Cr (krom), ki jeklu spremeni sestavo, da ne oksidira. Torej legirno jeklo z deležem kroma nad 11 % postane nerjavno. Jeklo ima tudi lastnost, da pri hitrem ohlajanju (kaljenju) spremeni lastno strukturo in drastično spremeni lastnosti. Torej jeklo pri normalnem ohlajanju ima določeno sestavo in lastnosti, po kaljenju pa se sestava močno spremeni in s tem tudi lastnosti. Te lastnosti na koncu proizvodnega procesa preverjamo z raznimi poskusi za žilavost, trdoto, razteznost idr. Tudi na tem segmentu nam pomaga računalniška tehnologija.

Z računalniškim programom JMatPro lahko izračunamo snovne lastnosti jekla. Vedeti moramo le sestavo jekla, ki ga hočemo izračunati. Za jekli 50CrV4 in 51CrMoV4/52CrMoV4 smo z omenjenim programom izračunali lastnosti, ki se zelo razlikujejo. Pri normalni ohladitvi se po mikrostrukturni sestavi ne močno razlikujeta. Obe vsebujeta avstenit, MnS, ferit in cementit, opazne so le rahle razlike v odstotnih deležih. Tudi pri ostalih lastnostih, kot je gostota, specifična toplota in toplotna prevodnost jekli ne kažeta velikega razhajanja, le na točki prehoda iz kapljevitega v trdno stanje in pri spreminjanju sestave iz avstenita v druge mikrostrukture (ferit, cementit) nastopajo manjša razhajanja.

Lastnosti in mikrostruktura se pri obeh jeklih spremenita po kaljenju. Jeklo 51CrMoV4/52CrMoV4 dobi precej bolj zapleteno mikrostrukturno sestavo (avstenit, martenzit, ferit, bainit in perlit), medtem ko jeklo 50CrV4 bolj enostavno (ferit, bainit in perlit). V gostoti, toplotni prevodnosti, specifični toploti se ne razlikujeta posebej, razen pri točki spremembe avstenita v druge mikrostrukture (perlit, ferit itd.). Največje razlike nastopijo pri trdoti, natezni trdnosti in 0,2 % preizkusu. Tokrat razlike postanejo bolj očitne, saj jeklo 51CrMoV4/52CrMoV4 presega jeklo 50CrV4 v vseh segmentih za približno 50 %.

Pokaže se, da se lastnosti jekla lahko drastično spremenijo zaradi dodanih legirnih elementov jeklu med litjem in s postopki poboljšanja jekla. Rezultati, pridobljeni s primerjavo jekel, so zelo pomembni v jeklarski industriji. Skoraj vse snovne lastnosti jekla lahko tako pridobimo v nekaj minutah, sicer bi morali opraviti dolgotrajne in ekonomično zahtevne postopke. Ustrezni postopki bi zahtevali topljenje surovega železa, legiranje in hlajenje posameznih vzorcev jekla. Nato bi morali za pridobljeno jeklo opraviti vse potrebne preizkuse za določitev mehanskih in termičnih lastnosti. Za pridobitev dodatnih lastnosti po kaljenju, bi morali jeklo ponovno kaliti in ponovno opraviti vse poskuse za določanje vseh snovnih lastnosti. Z računalniškim programom JMatPro pa v nekaj minutah lahko izračunamo vse željene podatke. Prednost je očitna, saj prihranimo ogromno časa in tudi na ekonomski ravni prihranimo veliko sredstev.

11 LITERATURA

Aberšek, B. (1995). Tehnologija in obdelava gradiv. Radovljica: Didakta.

Jocić, B. (1996). Jekla in železove litine. 1. izdaja. Ljubljana: Slovenske železarne.

Kovač, M. (1999). Gradiva, zapiski predavanj. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo.

Leskovar, P. (1978). Preizkušanje kovin, litje, važnejša nekovinska gradiva, korozija in površinska zaščita. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo.

Peljhan, C. (1980). Uvod v metalurgijo. Ljubljana: Univerzitetna tiskarna.

Saunders, N., Guo, Z., Li, X., Miodownik, A.P., and Schillé, J.-Ph. (2003). Using JMatPro to Model Materials Properties and Behavior. JOM str.: 60–65. Pridobljeno 26.9.2006 s svetovnega spleta:

[http://doc.tms.org/ezMerchant/prodtms.nsf/ProductLookupItemID/JOM-0312-60/\\$FILE/JOM-0312-60F.pdf?OpenElement](http://doc.tms.org/ezMerchant/prodtms.nsf/ProductLookupItemID/JOM-0312-60/$FILE/JOM-0312-60F.pdf?OpenElement)

Thermotech Ltd / Sente Software Ltd. Surrey Technology Centre 40 Occam Road GU2 7YG UNITED KINGDOM. Pridobljeno 24.9.2006 s svetovnega spleta: <http://www.thermotech.co.uk/details.html#solidif>.

Vodopivec F. (2002). Kovine in zlitine. Kristalna zgradba, mikrostruktura, procesi, sestava in lastnosti. Ljubljana: Inštitut za kovinske materiale in tehnologije.