



VPLIV TOPLOTNE OBDELAVE NA MIKROSTRUKTURO IN FIZIKALNE LASTNOSTI JEKLA

Področje: **fizika**

Vrsta naloge: **raziskovalna naloga**

Dijaki:

Anže DEMŠAR, 1.F

Anej OKORN, 1.E

Anžej ŽAGAR, 2.D

Mentorica: **dr. Sonja KITAK** – Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana

Somentor: **prof. dr. Aleš NAGODE** - Naravoslovnotehniška fakulteta

2023

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Vpliv toplotne obdelave na mikrostrukturo in fizikalne lastnosti jekla: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2023

KAZALO

1 UVOD	5
2 TEORIJA	7
2.1 Jeklo C45	8
2.2 Spremembe pri segrevanju	9
2.2.1 Normalizacija	11
2.2.2 Kaljenje	12
2.2.3 Popuščanje	14
2.4 Trdota	19
2.5 Toplotna prevodnost	21
3 EMPIRIČNI DEL	23
3.1 Hipoteze	23
3.2 Metode raziskovanja	24
3.2.1 Vrstični elektronski mikroskop	24
3.2.2 Hot disk TPS 2200	26
3.3 Potek dela	29
3.3.1 Segrevanje vzorcev jekla	29
3.3.2 Ohlajanje vzorcev jekla	30
3.3.3 Priprava vzorcev jekla na nadaljnje raziskave	31
3.3.4 Preverjanje trdote vzorcev	32
3.3.5 Ogled vzorcev pod mikroskopi	34
3.3.6 Preizkus toplotne prevodnosti vzorcev	38
3.4 Razprava in rezultati raziskave	40
4 ZAKLJUČEK	43
4.1 Zahvale	44
5 Viri	45

KAZALO SLIK

Slika 1: Palice jekla C45	8
Slika 2: 1. Fazni diagram Fe-Fe ₃ C.....	11
Slika 3: Diagram normalizacije	12
Slika 4: CCT graf za jeklo.....	13
Slika 5: 2. Fazni diagram Fe-Fe ₃ C.....	18
Slika 6: Vrstični elektronski mikroskop Thermo Fisher Scientific, model Quattro S (UL NTF)	25
Slika 7: Hot disk TPS 2200	26
Slika 8: Hot disk senzor 5501, 5465 in 4921	28
Slika 9: 2. Fazni diagram Fe-Fe ₃ C.....	29
Slika 10: CCT diagram jekla s podanimi potmi ohlajanja za vzorce	30
Slika 11: Naprava za merjenje trdote po Rockwellu	32
Slika 12: Naprava za merjenje trdote po Vickersu in konica od blizu	33
Slika 13: Vdolbina od merjenja trdote po Rockwellu pod elektronskim mikroskopom na 100-kratni povečavi.....	33
Slika 14: Kaljeno jeklo skozi svetlobni mikroskop, 1000-kratna povečava (martenzit)	34
Slika 15: Normalizirano jeklo skozi svetlobni mikroskop, 1000-kratna povečava (ferit in perlit)	35
Slika 16: Shematski prikaz perlita od strani.....	35
Slika 17: Kaljeno jeklo pod elektronskim mikroskopom, 1000-kratna povečava (martenzit)	36
Slika 18: Kaljeno in popuščano jeklo pod elektronskim mikroskopom, 1000-kratna povečava (popuščen martenzit – vidijo se karbidni delci v martenzitu).....	36
Slika 19: Normalizirano jeklo pod elektronskim mikroskopom, 500-kratna povečava (ferit in perlit).....	37
Slika 20: Normalizirano jeklo pod elektronskim mikroskopom, 2500-kratna povečava (ferit in lamelni perlit).....	37
Slika 21: Toplotna prevodnost normaliziranega jekla C45.....	38
Slika 22: Toplotna prevodnost kaljenega jekla C45.....	38
Slika 23: Toplotna prevodnost kaljenega ter popuščenega jekla C45.....	38
Slika 24: Prevodnost toplotno neobdelanega jekla C45	38 ¹

¹ Viri slik, če so potrebni, so podani kot hiperpovezave v naslovih slik.

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Vpliv toplotne obdelave na mikrostrukturo in fizikalne lastnosti jekla: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2023

KAZALO TABEL

Tabela 1: Vrste popuščanj	14
Tabela 2: Trdote po Vickersovi lestvici	41

KAZALO GRAFOV

Graf 1: Toplotna prevodnost jekla v odvisnosti od grelne moči	39
Graf 2: Trdote po Rockwellovi lestvici trdote	40

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Vpliv toplotne obdelave na mikrostrukturo in fizikalne lastnosti jekla: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2023

POVZETEK

V našem raziskovalnem delu smo preučevali učinke, ki jih ima segrevanje na mikrostrukturo in lastnosti jekla C45. Posvečali smo se predvsem razmerju med temperaturo, časom in hitrostjo ohlajanja ter posledičnimi spremembami v mikrostrukturi jekla, fazni sestavi, velikosti zrn in mehanskih lastnostih.

V procesu izdelovanja raziskovalne naloge smo uporabili razne vrste eksperimentalnih tehnik, kot so optična (OM) in vrstična elektronska (SEM) mikroskopija, preskušanje trdote in merjenje toplotnih lastnosti, s katerimi smo opisali mikrostrukturo in spremembe lastnosti jekel C45.

Naši rezultati omogočajo vpogled v toplotno obnašanje jekla in njegove posledice za praktično uporabo na različnih področjih, kot so gradbeništvo, avtomobilska industrija, letalska industrija in energetika.

Ključne besede:

jeklo, C45, trdota, toplotna prevodnost, trdota po Vickersu, trdota po Rockwellu, kristalna struktura, fizikalne lastnosti, mikrostruktura

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Vpliv toplotne obdelave na mikrostrukturo in fizikalne lastnosti jekla: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2023

ABSTRACT

In our research work, we have studied the effects of heating on the microstructure and properties of C45 steel. The focus was on the relationship between temperature, time and cooling rate and the resulting changes in the steel's crystal structure, phase composition, grain size and mechanical properties.

In the process of the research thesis, various experimental techniques such as optical (OM) and scanning electron (SEM) microscopy, hardness testing and thermal analysis were used to characterise the microstructure and property changes of C45 steels.

Our results provide insights into the thermal behavior of steel and its implications for practical applications in diverse fields such as construction, automotive, aerospace and energetics.

Keywords:

steel, C45, hardness, thermal conductivity, Vickers hardness, Rockwell hardness, crystal structure, physical properties, microstructure

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Vpliv toplotne obdelave na mikrostrukturo in fizikalne lastnosti jekla: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2023

1 UVOD

Fizika je naravoslovna veda, ki obsega najrazličnejša področja, kot so termodinamika, klasična mehanika, astrofizika, jedrska fizika itd.

V tej raziskovalni nalogi se bomo ukvarjali s klasično mehaniko in termodinamiko.

Nalogo bomo razdelili na teoretični del, v katerem bomo podali enačbe in razložili materiale, s katerimi bomo delali, ter na empirični ali praktični del, v katerem bomo poizkušali s prakso razložiti podano teorijo ter naše hipoteze, pri tem si bomo pomagali z različnimi napravami, ki jih bomo tudi opisali. Na koncu bomo rezultate primerjali še z našimi hipotezami in o temi razpravljali.

2 TEORIJA

V tem delu raziskovalne naloge smo opisali splošno znana dejstva in razlage, ki smo jih pridobili med izdelavo raziskovalne naloge; nekatere izmed informacij so nam predali naši mentorji, druge pa smo poiskali v razni literaturi, spletiščih itn.

Fokus teoretičnega dela je predvsem na jeklu C45, teoriji spreminjanja njegovih lastnosti s segrevanjem, teoriji kristalne zgradbe jekla ter pojasnitvi fizikalnih enačb in pojmov, ki smo jih pri izdelavi naloge pridobili in uporabili.

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Vpliv toplotne obdelave na mikrostrukturo in fizikalne lastnosti jekla: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2023

2.1 Jeklo C45

C45 je srednje ogljično jeklo, ki se pogosto uporablja za strojne dele in komponente, kot so zobniki, gredi, čepi in vijaki. Vsebnost ogljika je približno 0,45 mas. %, kar mu zagotavlja dobro ravnovesje med trdnostjo in duktilnostjo.

Jeklo C45 je znano po svojih odličnih mehanskih lastnostih, vključno z dobro odpornostjo proti obrabi, žilavostjo in trdoto. Za izboljšanje lastnosti ga je mogoče toplotno obdelati, na primer s kaljenjem in popuščanjem, kar spremeni mikrostrukturo in posledično plastičnost, trdoto ter toplotno prevodnost.

C45 je zaradi svoje dobre obdelovalnosti in varivosti priljubljen material za strojno obdelavo. Z lahkoto ga obdelujemo in oblikujemo v najrazličnejše oblike in velikosti, zato je vsestranski material za široko paleto produktov.



Slika 1: [Palice jekla C45](#)

2.2 Spremembe pri segrevanju

Jeklo je zlitina železa in ogljika, običajno pa vsebuje tudi druge legirne elemente kot so krom, mangan, silicij itd. Toplotne lastnosti materialov, vključno z jeklom, se lahko s spremembami temperature bistveno spremenijo. Pri segrevanju jekla se njegova toplotna prevodnost poveča, prav tako pa se poveča njegov koeficient toplotnega raztezanja. Hkrati lahko temperaturne spremembe vplivajo na mehanske lastnosti jekla, kot sta trdnost in duktilnost.

Eden od ključnih učinkov segrevanja jekla je, da lahko povzroči spremembe v mikrostrukturi železa in jekla. Pri segrevanju železa se pri 910 °C α -Fe (ferit) spremeni v γ -Fe (avstenit). Podobno je tudi pri segrevanju jekla na visoke temperature, ko pridemo na področje avstenita, ki ima drugačne toplotne in mehanske lastnosti kot prvotno jeklo pri sobni temperaturi. Poleg tega lahko hitro segrevanje in ohlajanje jekla (kaljenje) povzroči notranje napetosti v jeklu, ki vplivajo na njegove fizikalne lastnosti.

Na splošno je pomembno, da pri načrtovanju sestavnih delov ali sistemov za visokotemperaturna okolja upoštevamo učinke segrevanja na jeklo in druge materiale. Skrbna izbira materialov in ustrezni postopki toplotne obdelave lahko pomagajo zagotoviti doseganje zelenih fizikalnih lastnosti.

Pri segrevanju jekla se njegove fizikalne in mehanske lastnosti večkrat spremenijo. Navajamo nekaj ključnih sprememb, ki se zgodijo v jeklu pri segrevanju:

- Raztezanje: Jeklo se pri segrevanju razširi zaradi povečanega molekularnega gibanja. Velikost raztezanja je odvisna od temperature in sestave jekla.

- Mehčanje: Ko se jeklo segreva, se njegova trdnost zmanjša, postane mehkejša in bolj duktilno. Do tega pride, saj se zaradi spremembe v kristalni mreži jekla atomi po njej lažje premikajo, zato se jeklo lažje deformira.

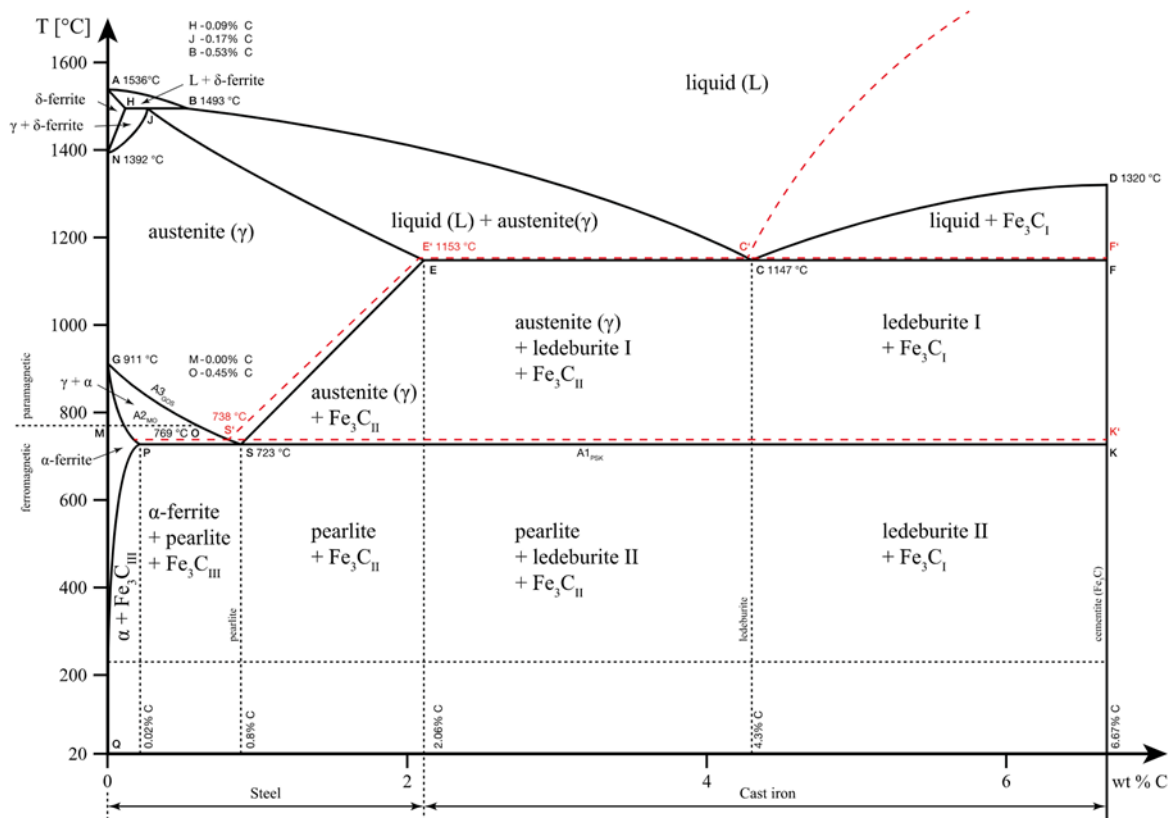
- Sprememba mikrostrukture: Glede na temperaturo in trajanje segrevanja se spremeni mikrostruktura jekla. Ko jeklo segrejemo nad neko določeno temperaturo (kritična temperatura), se lahko iz telesno centrirane kubične strukture spremeni v ploskovno centrirano kubično strukturo, to imenujemo avstenitizacija.

- Oksidacija: Pri visokih temperaturah jeklo reagira s kisikom v zraku, to posledično povzroči oksidacijo. Ta pa omogoči nastanek površinskih oksidnih plasti in zmanjšanje mehanskih lastnosti.

- Izguba magnetnih lastnosti: Pri visokih temperaturah jeklo izgubi svoje magnetne lastnosti, saj zaradi toplote magnetne domene postanejo neurejene.

- Zmanjšanje žilavosti: Pri visokih temperaturah kristalna zrna močno zrastejo in posledično postane jeklo krhkejše in izgubi žilavost, zaradi česar je lahko bolj izpostavljeno razpokam in okvaram.

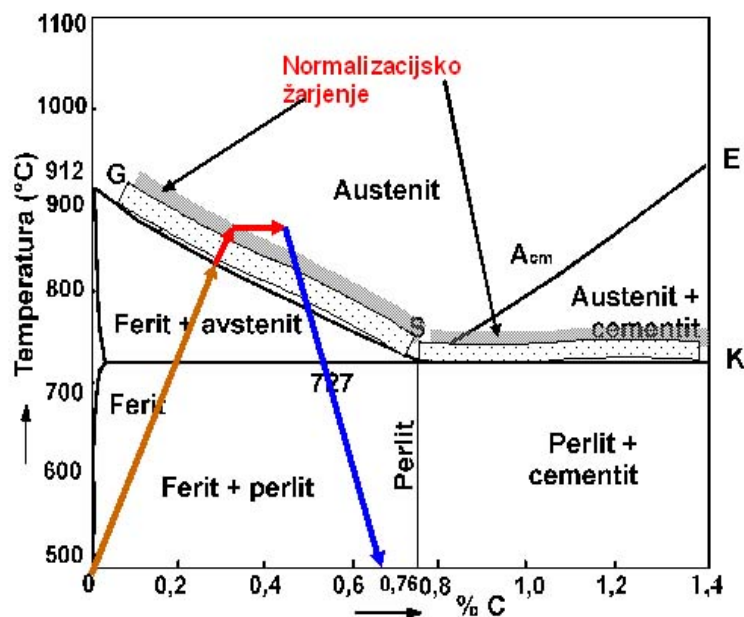
Na splošno lahko spremembe, ki se zgodijo v jeklu pri segrevanju, bistveno vplivajo na njegovo zmogljivost in primernost za določene produkte. Zato je pri načrtovanju sestavnih delov ali sistemov pomembno skrbno upoštevati učinke segrevanja na jeklo.



Slika 2: 1. [Fazni diagram Fe-Fe₃C](#)

2.2.1 Normalizacija

Normalizacija ali normalizacijsko žarjenje je toplotna obdelava, pri kateri jeklo segrejemo v področje avstenita, zadržimo in nato ohlajamo na zraku z namenom, da dobimo perlitno oz. perlitno-feritno mikrostrukturo z manjšimi kristali (udrobnjena mikrostruktura). S tem se poveča trdnost jekla.



Slika 3: [Diagram normalizacije](#)

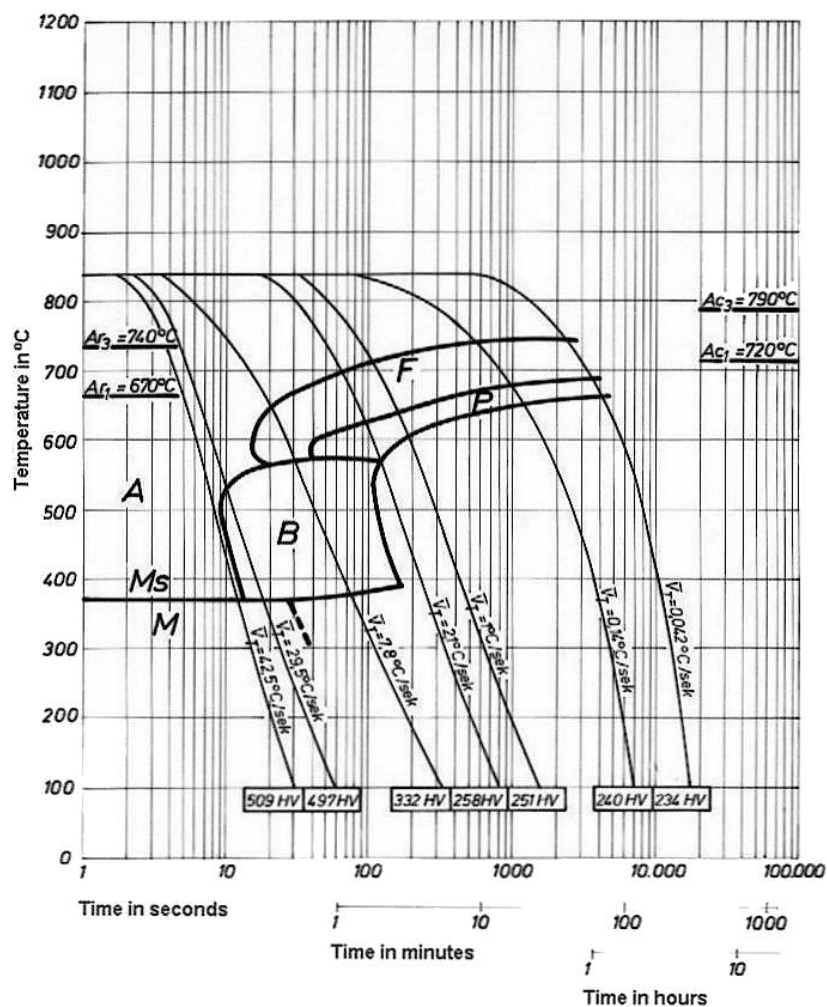
2.2.2 Kaljenje

Kaljenje je toplotna obdelava, s katero jeklo močno utrdimo, pri tem pa nastane nova faza martenzit. Martenzit je izjemno trda faza, vendar pa ima zelo majhno žilavost in visoke notranje napetosti. Trdota martenzita je odvisna od ogljika, več kot ga jeklo vsebuje, večja je njegova trdota. Po kaljenju je potrebno popuščanje jekla za povečanje žilavosti oz. zmanjšanja trdote in trdnosti jekla, s čimer se dobi želeno kombinacijo trdote, trdnosti in žilavosti.

Na sliki 4 je prikazan diagram premenski diagram pri zveznem ohlajanju (CCT). Iz njega se lahko odčita, kako hitro moramo ohlajati iz področja avstenita, da nastane v mikrostrukturi martenzit pri kaljenju. Če ohlajamo nekoliko počasneje nastane v mikrostrukturi poleg martenzita še malo bainita, pri čemer se trdota zato zniža. Pri zelo počasnim ohlajanjem na zraku pa nastane v mikrostrukturi ferit in perlit.

Za nastanek martenzita v jeklu C45 jeklo kalimo v vodi ali slanici (raztopina vode in soli), da je hitrost ohlajanja dovolj velika, da se jeklo zakali na martenzit.

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Vpliv toplotne obdelave na mikrostrukturo in fizikalne lastnosti jekla: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2023



Slika 4: [CCT graf za jeklo](#)

2.2.3 Popuščanje

Toplotna obdelava, pri kateri izdelke po kaljenju popuščajo pri temperaturah od 100 °C do 700°C, imenujemo popuščanje, celotni postopek kaljenja in popuščanja pa poboljšanje. Namen poboljšanja je dobiti dobro trdnost in istočasno dobro žilavost izdelkov. Poboljšanje je torej toplotna obdelava, ki je sestavljena iz kaljenja in popuščanja. Izvaja se pri jeklih, ki imajo od 0,3 do 0,6 % C (ali več). V večini primerov so ta jekla legirana s Cr, Mo, Co, V, W, Ti in ostalimi. Pri tem imajo legirni elementi različno vlogo. V večini primerov po kaljenju izdelke ponovno segrevamo do 200 °C ter jih nato počasi ohlajamo do sobne temperature. To je obvezno pri kaljenju legiranih jekel v martenzitni stopnji. Namen takega segrevanja je zmanjšati nastale termične napetosti. Pri teh jeklih so te napetosti tako velike, da je zaradi njih lahko veliko izdelkov neuporabnih.

S takojšnjim popuščanjem se učinek notranjih napetosti bistveno zmanjša. Pri popuščanju lahko martenzitno strukturo jekel spremenimo v bainit, trustit, sorbit ali perlit. Pri izbrani temperaturi popuščanja nastane struktura, ki ima znane lastnosti. Z naraščanjem temperature popuščanja so notranje napetosti vse manjše, trdota pada, žilavost pa narašča. Čas popuščanja je od 1 do 3 ure.

Tabela 1: Vrste popuščanj

Temperatura popuščanja	Vrsta jekla
100 do 200 °C	dinamično neobremenjeni konstrukcijski elementi iz ogljikovih jekel po kaljenju in cementiranju
150 do 300 °C	ogljikova in malo legirana orodna jekla
500 do 580 °C	hitrorezna jekla
530 do 670 °C	posebna jekla za poboljšanje

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Vpliv toplotne obdelave na mikrostrukturo in fizikalne lastnosti jekla: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2023

do 700 °C	utopna jekla
-----------	--------------

Načini segrevanja:

- v segretem olju
- v solnih pečeh
- v pečeh.

Glede na temperaturo je popuščanje lahko:

- nizko do 200 °C – martenzitni stopnji
- srednje v bainitni ali trustitni stopnji
- visoko v sorbitni ali perlitni stopnji
- zelo visoko – pri posebnih jeklih
- popuščanje v martenzitni stopnji.

Pri popuščanju do 200 °C je struktura še vedno martenzitna. Uporablja se po kaljenju in cementiranju ogljikovih jekel. Pri tem popuščanju se po daljšem žarenju iz martenzita deloma izloči ogljik.

Popuščanje v bainitni stopnji je najpogostejše v praksi. Bistveno zmanjšanje notranjih napetosti in bainitna struktura sta vzrok za povečanje trdnosti in žilavosti. Pri tem se trdota zmanjša. Izvaja se pri ogljikovih in nizko legiranih orodnih jeklih.

Popuščanje v trustitni in sorbitni stopnji poteka pri temperaturah od 350 do 500 °C. Glede na kemično sestavo jekel in izbrano temperaturo se martenzit spremeni v trustit ali sorbit. Po tej vrsti popuščanja je trdota bistveno manjša, žilavost pa je očitno večja. Notranje napetosti so skorajda popolnoma odpravljene, posledično je trdnost izdelkov zelo dobra. Popuščanje v tej stopnji je primerno za legirana jekla in izdelke, ki morajo imeti dobro trdnost in žilavost.

Visoko temperaturno popuščanje poteka pri temperaturah do 700 °C. To popuščanje se uporablja pri izdelavi dinamično obremenjenih izdelkov, ki morajo imeti zelo dobro trdnost, trdoto in pa žilavost. V tem primeru so jekla legirana z V, Nb, Ti, Co, W, Mo, Cr ipd. Pri teh temperaturah legirni elementi s sproščenim ogljikom (in/ali dušikom) tvorijo zelo trde in stabilne karbide in/ali nitride. Pri tem je ključno, da so izločeni karbidi ali nitridi zelo drobni in porazdeljeni enakomerno po celotni strukturi. To je možno le, če so karbidi nastali z ogljikom, ki je bil prisilno raztopljen v martenzitu.

Jekla, ki se bodo uporabljala pri visokih temperaturah npr. za izdelavo orodij za tlačo litje, za vroče valjanje za cevi v termoenergetskih centralah je potrebno visokotemperaturno popuščanje. Pri orodnih jeklih je potrebno tudi večkratno popuščanje, da dobi stabilne lastnosti za uporabo pri višjih temperaturah.

2.3 Mikrostrukturne sestavine v jeklih

Jeklo je polikristaliničen material, kar pomeni, da je sestavljen iz več kristalnih zrn. Zanj je značilen polimorfizem. To pomeni, da ima več kristalnih struktur, odvisne so od temperature in sestave jekla. Najpomembnejše faze v jeklu so ferit (α), avstenit (γ) in cementit (Fe_3C). Če jeklo legiramo, lahko stabiliziramo avstenit in dobimo avstenitno jeklo. Če pa jeklu dodamo elemente, ki stabilizirajo ferit, pa lahko nastane feritno jeklo.

- Avstenitno jeklo ima avstenitno mikrostrukturo. Ob dodatku dovolj velike količine kroma, je lahko korozijsko obstojno (nerjaveče jeklo, ki vsebuje veliko niklja in kroma, zaradi česar je zelo odporno proti koroziji). Ima kubično ploskovno centrirano kristalno rešetko (PCK) in je nemagnetno.

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Vpliv toplotne obdelave na mikrostrukturo in fizikalne lastnosti jekla: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2023

- Feritno jeklo ima mikrostrukturo iz ferita, ki ima telesno centrirano kubično kristalno strukturo (TCK) in je magnetno do 769 °C – Currijeva temperatura. Vsebuje malo ogljika in je znano po visoki odpornosti proti napetostnemu korozijskemu pokanju ter odpornosti proti koroziji v določenih okoljih.

Cementit: Cementit je v jeklu lahko samostojna faza, običajno pa s feritom tvori mikrostrukturno sestavino perlit ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$). Sestavljen je iz izmeničnih plasti ferita in cementita ter ima lamelozno morfologijo.

Pri jeklih, ki vsebuje 0,76 % C nastane samo perlit. Ta jekla se imenujejo perlitna jekla, ki se lahko zaradi dobre obrabne odpornosti uporablja za železniške tire in kolesa vlakov.

Poleg ravnotežnih faz ferita, avstenita in cementita, lahko v jeklu pri neuravnoteženih pogojih nastanejo še:

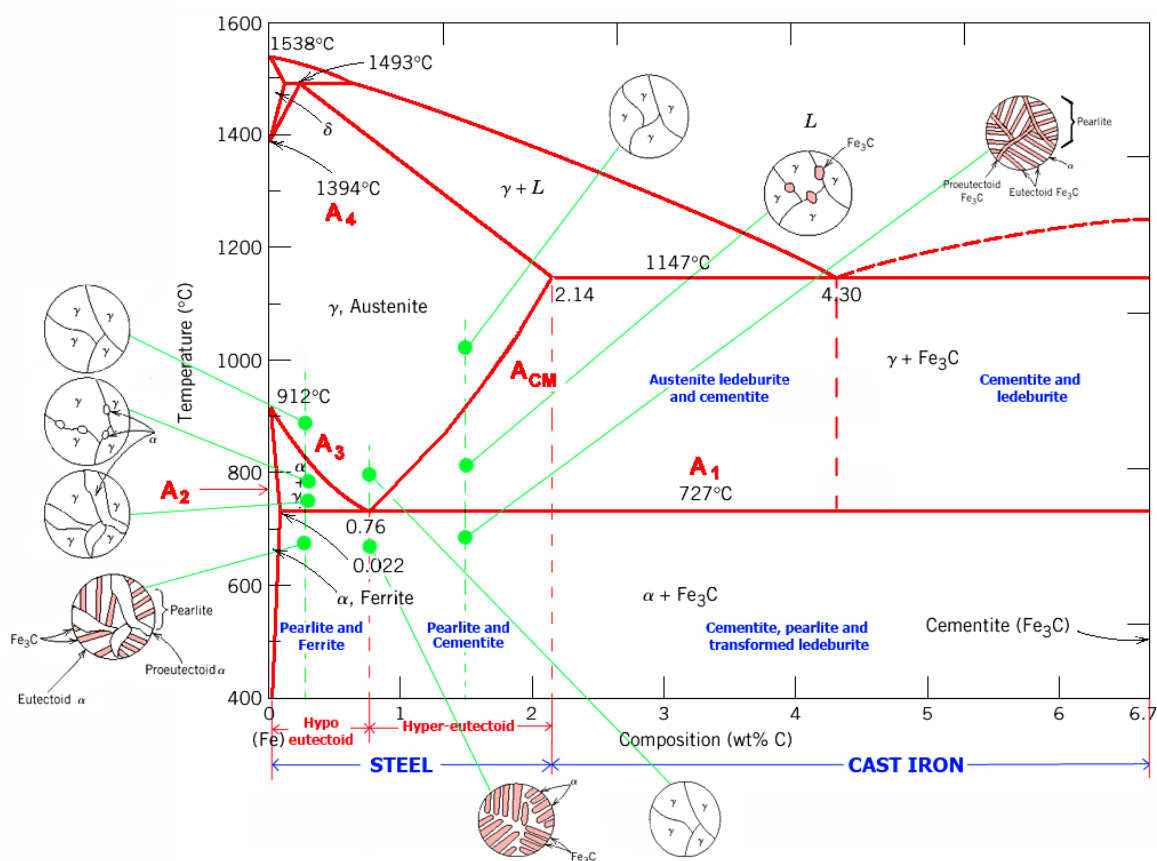
Ostale vrste kristalnih struktur, ki so lahko prisotne v jeklu, pa vključujejo:

- Martenzit: Ta nastane pri hitrem ohlajanju (kaljenju) iz avstenita. Ima kristalno strukturo s telesno centrirano tetragonalno strukturo (TCT), njegova trdota je odvisna od ogljika. Martenzitna jekla imajo veliko trdoto in trdnost ter slabo žilavost in duktilnost.

- Bainit: Bainit je mikrostruktura, ki nastane v jeklu pri zmernem ohlajanju. Sestavljen je iz ploščatih kristalov ferita in cementita ter ima ploščato kristalno strukturo. Bainitna jekla se lahko uporabljajo za tlačne posode za turbinske lopatice itd., ki morajo obratovati pri povišanih temperaturah in tlakih.

Vrste posebnih mikrostruktur v jeklu so odvisne od različnih dejavnikov, kot sta sestava in toplotna obdelava jekla. Od tega pa so odvisne mehanske in fizikalne lastnosti jekla.

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Vpliv toplotne obdelave na mikrostrukturo in fizikalne lastnosti jekla: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2023



Slika 5: 2. Fazni diagram Fe-Fe₃C

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Vpliv toplotne obdelave na mikrostrukturo in fizikalne lastnosti jekla: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2023

2.4 Trdota

Trdota je merilo odpornosti materiala na vtiske ali praske. Trdoto lahko merimo po Rockwellu, Vickersu ali Brinellu.

Trdota jekla se običajno meri na lestvici od 0 do 100, pri čemer višje vrednosti pomenijo večjo trdoto. Jeklo C45 ima na primer običajno trdoto po Rockwellu približno 55–58 HRC. Pomembno je poudariti, da je trdota sicer pomembna lastnost jekla, vendar ni edina lastnost, ki je pomembna za vsako uporabo. Glede na predvideno uporabo jekla so lahko pomembne tudi druge lastnosti, kot so žilavost, odpornost proti koroziji in odpornost proti obrabi.

Za izračun trdote materiala na podlagi njegovih fizikalnih lastnosti se uporablja več formul. Dve pogosto uporabljeni formuli za določanje trdote jekla sta Vickersov in Rockwellov preizkus trdote.

Pri preizkusu trdote po Rockwellu se v testiranem materialu naredi vdolbina z diamantnim ali krogličnim vtiskovalnikom. Izmeri se globina vtisa in se uporabi za izračun Rockwellovega trdotnega števila (HR) po naslednji formuli:

$$HR = N - \frac{d}{D}$$

N.....številka Rockwellove lestvice (npr. HRB ali HRC)

d.....globina vtisa v mm

D.....globina celotne penetracije v mm

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Vpliv toplotne obdelave na mikrostrukturo in fizikalne lastnosti jekla: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2023

Rockwellova metoda je le ena izmed različnih metod za merjenje trdote. Mnogi različni materiali za natančno določitev trdote potrebujejo drugačne metode testiranja in prav tako drugačne formule. Poleg tega lahko na rezultate preizkusov trdote vplivajo različni dejavniki, vključno s pogoji preizkušanja, velikostjo in obliko preizkušnega materiala ter natančnostjo uporabljene merilne opreme.

Vickersov preizkus trdote je še ena pogosto uporabljena metoda za merjenje trdote materialov. Pri Vickersovem testu trdote se uporablja diamantni piramidni vtiskovalnik, ki na površini preizkušnega materiala ustvari vdolbino. Izmeri se velikost vtisa, ki se uporabi za izračun Vickersovega trdotnega števila (HV) po naslednji formuli:

$$HV = 1,8544 \frac{P}{d^2}$$

P.....obremenitev, ki deluje na vtiskovalnik, v gramih sile (gf)

d.....povprečna diagonalna dolžina vdolbine v mikrometrih (μm)

Na Vickersov preizkus trdote vplivajo številni dejavniki, vključno z velikostjo vtiskovalnika, obremenitvijo, ki deluje na vtiskovalnik, in časom trajanja obremenitve. Kot pri vsakem preizkusu trdote je treba tudi Vickersov preizkus trdote opraviti previdno in pod ustreznimi pogoji, da se zagotovi natančne in zanesljive rezultate.

2.5 Toplotna prevodnost

Toplotna prevodnost je merilo za sposobnost materiala, da prevaja toploto. Opredeljena je kot količina toplote, ki se pretaka skozi enoto površine materiala v enoti časa, ko je v materialu enota temperaturnega gradienta. Toplotna prevodnost materiala se običajno označuje s simbolom k in ima enote $\frac{W}{mK}$, kjer je W toplotna energija, ki se prenese v enoti časa, m je razdalja, na kateri se toplota prenese, K pa je temperaturna razlika med dvema točkama.

Toplotna prevodnost jekla, vključno z jeklom C45, se spreminja glede na številne dejavnike, npr. vključno s sestavo, mikrostrukturo in temperaturo. Na splošno ima ogljikovo jeklo toplotno prevodnost približno od 30 do 50 $\frac{W}{mK}$, kar je manj kot pri številnih drugih kovinah, kot sta baker in aluminij.

Toplotna prevodnost je le ena od številnih lastnosti materialov, ki vplivajo na določeno uporabo.

Toplotno prevodnost materiala lahko izračunamo s Fourierevim zakonom o toplotni prevodnosti, ki pravi, da je toplotni tok (q) skozi material sorazmeren temperaturnemu gradientu ($\frac{dT}{dx}$) v materialu, kot sledi:

$$q = -k \cdot \frac{dT}{dx}$$

qtoplotni tok ($\frac{W}{m^2}$)

ktoplotna prevodnost ($\frac{W}{mK}$)

$\frac{dT}{dx}$temperaturni gradient ($\frac{K}{m}$)

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Vpliv toplotne obdelave na mikrostrukturo in fizikalne lastnosti jekla: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2023

To enačbo lahko preuredimo, da rešimo toplotno prevodnost:

$$k = -q \div \frac{dT}{dx}$$

Toplotno prevodnost lahko povežemo tudi z drugimi termodinamičnimi lastnostmi materiala, kot so specifična toplota (C_p), gostota (ρ) in toplotna difuzivnost (α):

$$k = C_p \cdot \rho \cdot \alpha$$

Ta enačba je znana kot enačba toplotne prevodnosti in je lahko uporabna v primerih, ko poznamo specifično toplotno kapaciteto, gostoto in toplotno difuzivnost materiala, ne poznamo pa toplotne prevodnosti.

Toplotni tok materiala se tako kot pri trdoti lahko spreminja glede na več dejavnikov, vključno s temperaturo, tlakom in sestavo. Zato je treba paziti, da se za določeno aplikacijo uporabijo ustrezne vrednosti.

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Vpliv toplotne obdelave na mikrostrukturo in fizikalne lastnosti jekla: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2023

3 EMPIRIČNI DEL

V nadaljevanju naloge se posvečamo praktičnemu delu, v katerem smo poskušali potrditi prej podano teorijo in smo ga izvajali med potekom izdelave raziskovalne naloge.

V ta del smo vključili hipoteze, ki smo si jih zastavili, opis postopkov in poteka dela, ki smo ga izvedli, ter končne rezultate in meritve.

Drugi del naloge vključuje še opise nekaterih naprav, ki smo jih spoznali in uporabili v procesu raziskovanja.

3.1 Hipoteze

Na podlagi teorije smo postavili naslednje hipoteze:

- Različna hitrost ohlajanja vpliva na mikrostrukturo jekla.
- Ob toplotni obdelavi se toplotna prevodnost ne spremeni.
- Kaljen ter kaljen in popuščan vzorec se po fizikalnih lastnostih ne bosta bistveno razlikovala.

3.2 Metode raziskovanja

3.2.1 Vrstični elektronski mikroskop

Pri praktičnem delu naše raziskovalne naloge smo uporabili vrstični elektronski mikroskop Thermo Fisher Scientific Quattro S.

Thermo Scientific Quattro S je vrstični elektronski mikroskop na poljsko emisijo (FEG SEM). Omogoča delovanje v treh vakuumskih načinih in sicer v visokem vakuumu ($< 6 \times 10^{-4}$ Pa), nizkem vakuumu (do 200 Pa) in v ESEM načinu (do 2000 Pa za vodo oz. 4000 Pa za N₂).

Za slikanje vzorcev je FEG SEM Quattro S opremljen z detektorji sekundarnih (SE) Everhart–Thornley, povratno sipanih (PSE) in presevnih elektronov (STEM). Le-ta združuje principe, ki se uporabljajo v presevnih (TEM) in vrstičnih elektronskih mikroskopih (SEM). Ločljivost v visokem vakuumskem načinu znaša 0,8 nm (STEM), 1,0 nm (SE) oz. 2,5 nm (PSE), v ESEM načinu pa 1,3 nm (SE) oz. 2,5 nm (PSE). Za analizo kemijske sestave je vgrajen EDXS SDD detektor nove generacije Ultim® Max s površino 65 mm², proizvajalca Oxford Instruments.

FEG SEM Quattro S omogoča nanokarakterizacijo:

- kovin & zlitin, zvarov, magnetnih in supermagnetnih materialov;
- keramičnih in polimernih materialov, kompozitov;
- tankih plasti;
- mineralov;
- mehkih materialov: tekstilij, filtrov, gelov, rastlin in tkiv.

Za izvedbo dinamičnih preiskav med ohlajanjem in segrevanjem je Quattro S opremljen z nosilcema za ohlajanje do -60 °C in segrevanje do 1000 °C. Z njima mikroskop omogoča "in situ" študije procesov:

- (re)kristalizacije in faznih transformacij;
- oksidacije, katalize;
- rasti materialov;
- hidracije, dehidracije in določevanje kota omočenja.

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Vpliv toplotne obdelave na mikrostrukturo in fizikalne lastnosti jekla: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2023



Slika 6: Vrstečni elektronski mikroskop Thermo Fisher Scientific, model Quattro S (UL NTF)

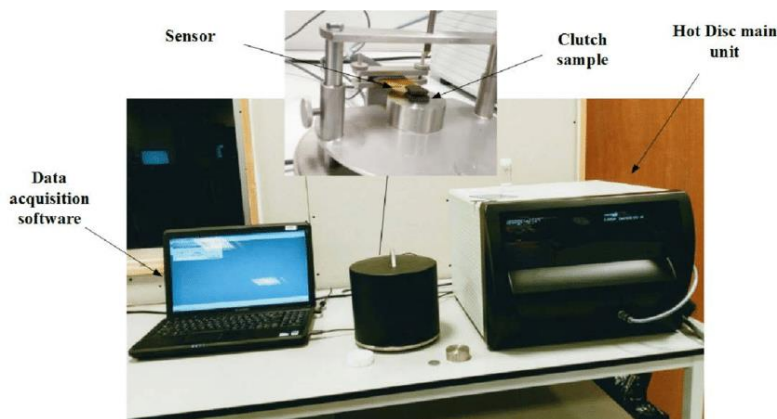
3.2.2 Hot disk TPS 2200

Hot Disk TPS 2200 je merilnik toplotne prevodnosti, ki se uporablja za merjenje toplotne prevodnosti in difuzivnosti trdnih snovi, tekočin, past in praškov. TPS 2200 deluje tako, da na eno stran vzorca usmeri temperaturni val in izmeri temperaturni odziv na nasprotni strani. Instrument uporablja tehniko prehodnega ravninskega vira (TPS), ki je nestacionarna, nedestruktivna metoda za merjenje toplotne prevodnosti.

TPS 2200 Hot Disk je sestavljen iz držala za vzorec, grelnika, temperaturnega senzorja in sistema za zbiranje podatkov. Vzorec se namesti med grelec in temperaturno tipalo, na grelec pa se vršijo temperaturne stopnje. Temperaturni senzor izmeri temperaturni odziv na nasprotni strani vzorca, ti podatki pa se uporabijo za izračun toplotne prevodnosti in difuzivnosti vzorca.

Hot Disk TPS 2200 ima več prednosti pred drugimi metodami za merjenje toplotne prevodnosti, med drugim visoko natančnost, točnost in hitrost. Ker je nedestruktivna metoda, se lahko vzorci po testiranju ponovno uporabijo.

TPS 2200 Hot Disk se uporablja v različnih panogah, vključno z znanostjo o materialih, toplotnim inženiringom in nadzorom kakovosti. Posebej uporaben je v panogah, kjer so natančne meritve toplotne prevodnosti ključnega pomena.



Slika 7: [Hot disk TPS 2200](#)

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Vpliv toplotne obdelave na mikrostrukturo in fizikalne lastnosti jekla: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2023

Senzorji Hot Disk se uporabljajo v merilnikih toplotne prevodnosti Hot Disk TPS (Transient Plane Source). Zasnovani so za merjenje toplotne prevodnosti in difuzivnosti različnih materialov.

Senzor Hot Disk je sestavljen iz majhne, tanke in ravne sonde v obliki diska, ki je običajno izdelana iz nerjavečega jekla. Sonda je na obeh straneh prevlečena s tanko plastjo platine, ki služi kot grelni element in temperaturni senzor. Plast platine je vstavljena med dve plasti izolacije, kar zagotavlja, da se toplota prenaša le v smeri, ki je pravokotna na ravnino senzorja.

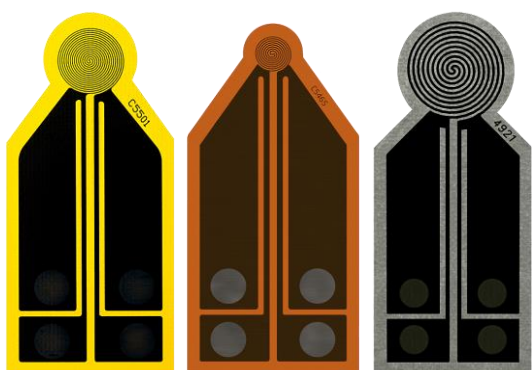
Senzor je oblikovan tako, da je v neposrednem stiku z vzorcem, ki ga preizkušamo. Ko na senzor deluje temperaturni val, temperaturni senzor izmeri temperaturni odziv na nasprotni strani senzorja. Ti podatki se nato uporabijo za izračun toplotne prevodnosti in difuzivnosti vzorca.

Obstaja več več vrst senzorjev Hot Disk, ki so zasnovani za različne namene:

- Standardni senzor: To je najpogostejša vrsta senzorja Hot Disk, ki je primerna za merjenje toplotne prevodnosti in difuzivnosti trdnih snovi, tekočin, past in praškov.
- Mini senzor: Ta senzor je v primerjavi s standardnim senzorjem manjši in je idealen za merjenje toplotnih lastnosti majhnih ali tankih vzorcev.
- Visokotemperaturni senzor: Ta senzor je zasnovan za visoke temperature in se lahko uporablja za merjenje toplotnih lastnosti materialov pri temperaturah do 1600 °C.
- Biološki senzor: Ta senzor je posebej zasnovan za biološke vzorce, kot so tkiva, tekočine in geli.

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Vpliv toplotne obdelave na mikrostrukturo in fizikalne lastnosti jekla: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2023

- Senzor po meri: Hot Disk ponuja tudi senzorje, zasnovane po meri, ki jih je mogoče prilagoditi posebnim produktom in vrstam vzorcev.
- Senzor za reaktivno gorivo: Ta senzor je posebej zasnovan za merjenje toplotnih lastnosti reaktivnega goriva in drugih letalskih goriv.
- Visokotlačni senzor: Ta senzor je zasnovan za merjenje toplotnih lastnosti vzorcev pod visokim tlakom.



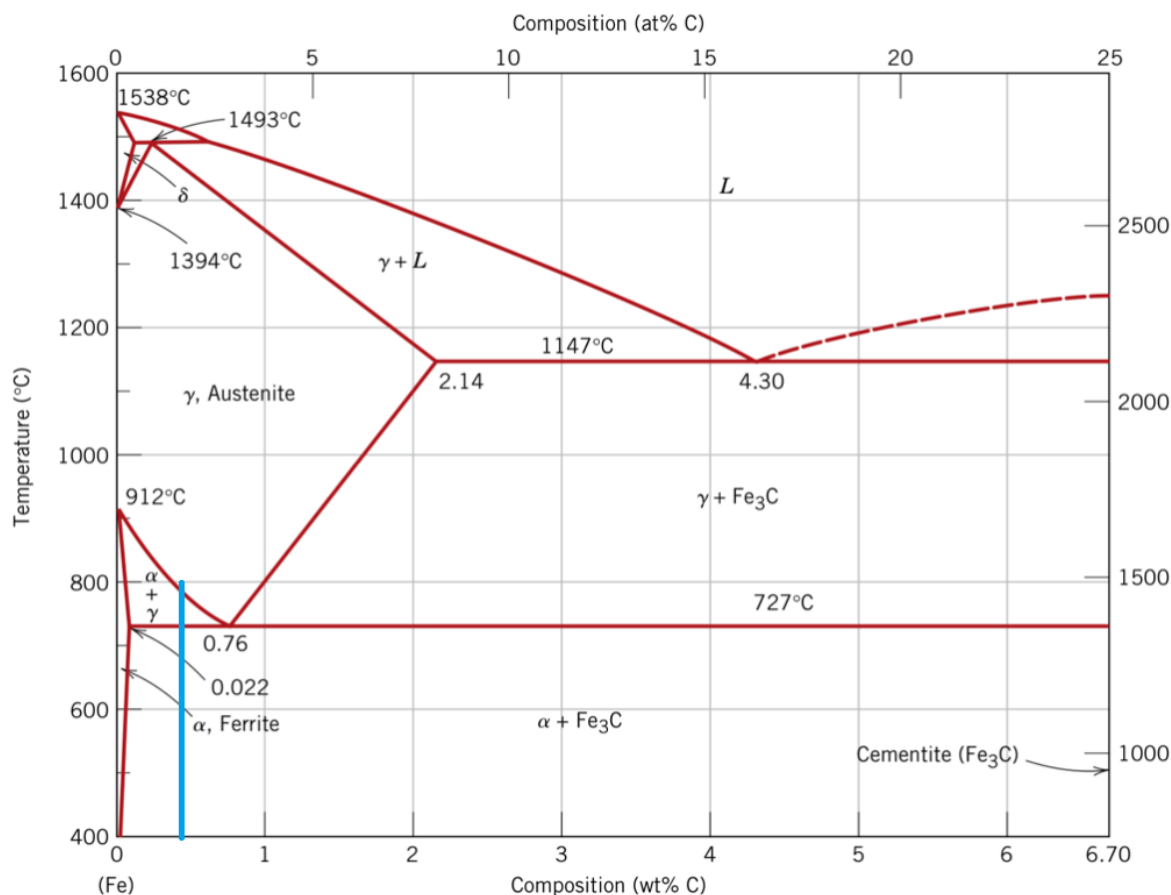
Slika 8: [Hot disk senzor 5501, 5465 in 4921](#)

3.3 Potek dela

V naslednjih nekaj točkah bomo opisali potek dela raziskave v posameznih korakih.

3.3.1 Segrevanje vzorcev jekla

Vzorec jekla moramo najprej enakomerno segreti in pri tem paziti, da se ne pregreje. To smo naredili v peči pri temperaturi 800 °C in je trajalo 30 minut, dokler se jeklo ni segrelo na temperaturo od 750 do 800 °C in prešlo v avstenitno fazo. Nato smo vzorce vzeli iz peči in enega pustili, da se počasi ohladi na zraku. Pri dveh pa je zatem sledilo hitro ohlajanje v vodi s kalilne temperature na sobno temperaturo; temu rečemo nadkritična hitrost ohlajanja. Za kaljenjem nastopijo zelo visoke napetosti v vzorcu, ki smo jih pri enem odpravili s popuščanjem v peči na 600 °C, popuščanje je trajalo 1 uro.



Slika 9: [2. Fazni diagram Fe-Fe₃C](#)

3.3.3 Priprava vzorcev jekla na nadaljnje raziskave

Za preiskavo na mikroskopih je treba vzorce metalografsko pripraviti, to je: rezati, brusiti, polirati in jedkati.

Rezanje: Prvi korak pri pripravi vzorca je rezanje na kolobarje, da lahko vidimo notranji presek.

Zalivanje v pol prevoden material: Drugi korak pri pripravi je bil zalivanje v pol prevodno epoksi smolo, ki bo držala kovino na mestu in zaradi pol prevodnosti pomagala pri pogledu na mikroskopih OM in SEM.

Brušenje: Tretji korak pri pripravi vzorca je bil brušenje, s tem smo odstranili vse površinske nepravilnosti ali pomanjkljivosti. Brušenje poteka najprej z grobim brusnim papirjem gradacije #200 ter se nadaljuje z bolj finim vse do gradacije #1200.

Poliranje: Po brušenju smo vzorec polirali z uporabo serije diamantnih abrazivnih suspenzij z delci, ki običajno segajo od 30 do 0,25 mikrometrov. Vzorec smo polirali na vrteči polirni plošči strojno, pred tem pa smo nanj namazali diamantno suspenzijo, da smo dobili čim večji lesk in zelo malo nepravilnosti.

Izpiranje: Po vsakem koraku brušenja in poliranja smo vzorec sprali z vodo, da smo odstranili ostanke abraziva ali nečistoč, nato smo ga še enkrat očistili z etanolom, da smo odstranili vodo, in ga posušili s sušilnikom ter obrisali z brisačko.

Jedkanje: Vse vzorce smo pred testiranjem še jedkali s 5 % raztopino dušikove kisline (Nital), ki odkrije mikrostrukturo. Jedkalo nagrizne kristalne meje in druge morfološke značilnosti posameznih faz, kar se na mikroskopu vidi kot mikrostruktura..

Sušenje: Po jedkanju smo vzorec še enkrat obrisali in pustili, da se je dokončno posušil na zraku.

3.3.4 Preverjanje trdote vzorcev

Trdoto smo merili na napravi za merjenje po Vickersu in po Rockwellu.

Pri napravi za merjenje po Vickersu je postopek bolj zapleten, zato nam je pomagal asistent Matija Zorc. V vzorec je vtisnjena piramidasta oblika, ki jo je potrebno pomeriti po vtiskovanju, in pri tem delu nam je pomagal profesor. Ko smo imeli premer kvadrata, smo lahko le-tega vstavili v osnovno enačbo in smo dobili rezultate.

$$HV = 1854,4 \frac{P}{d^2}$$

$$HV = 1854,4 \frac{1000 \text{ gf}}{96,3 \mu\text{m}^2}$$

$$HV = 1854,4 \cdot 0,108 \text{ HV}$$

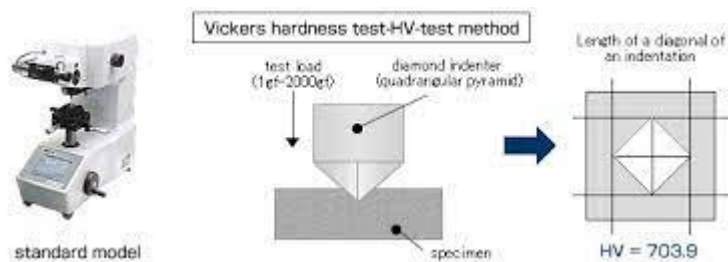
$$HV = 200 \text{ HV}$$

Nato smo merili še na napravi za merjenje po Rockwellovi lestvici trdote. To smo naredili tako, da smo vzorec postavili na podstavek in ga privijali, dokler ni prišel do krogličastega vbodnika. Takrat smo počakali, da se je merilo postavilo na ničlo, in potegnili ročico, naprava pa je naredila vdolbino in nam pokazala rezultat na merilu. Ta postopek smo ponovili trikrat za vsak vzorec, saj je manj natančen in smo hoteli čim manj naključnih napak.

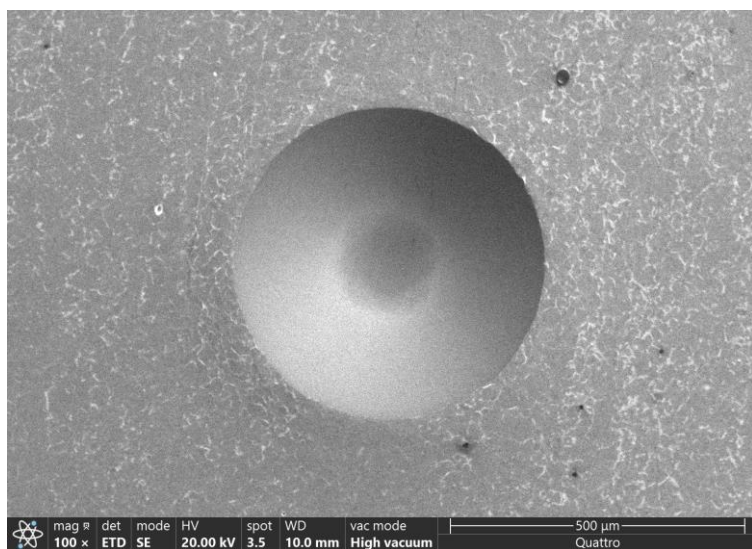


Slika 11: [Naprava za merjenje trdote po Rockwellu](#)

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Vpliv toplotne obdelave na mikrostrukturo in fizikalne lastnosti jekla: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2023



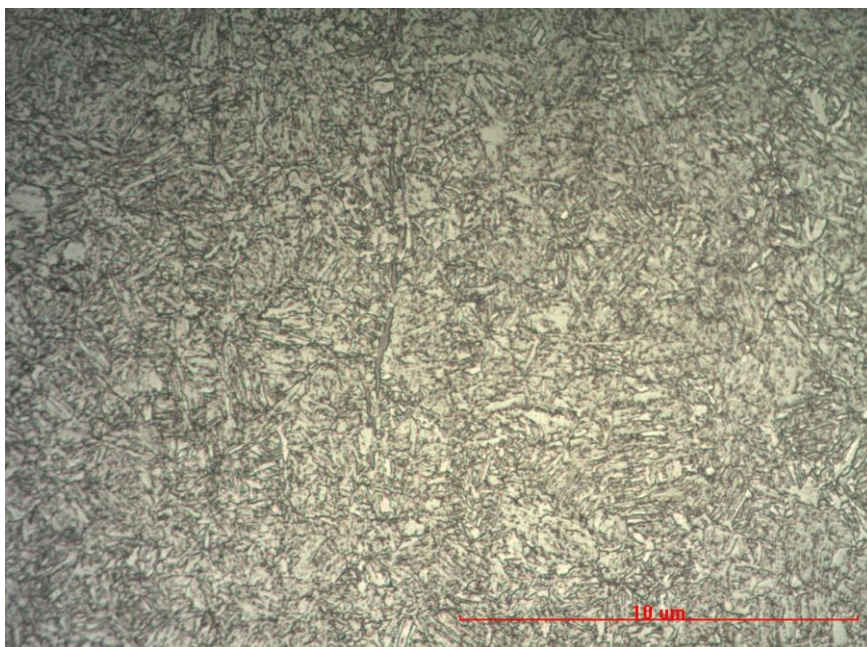
Slika 12: [Naprava za merjenje trdote po Vickersu in konica od blizu](#)



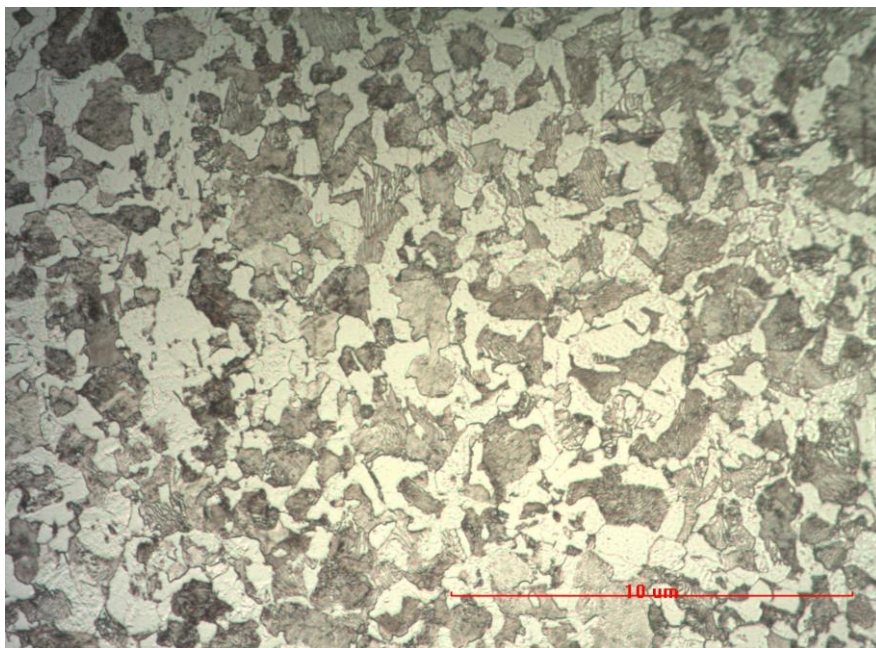
Slika 13: [Vdolbina od merjenja trdote po Rockwellu pod elektronskim mikroskopom na 100-kratni povečavi](#)

3.3.5. Ogled vzorcev pod mikroskopi

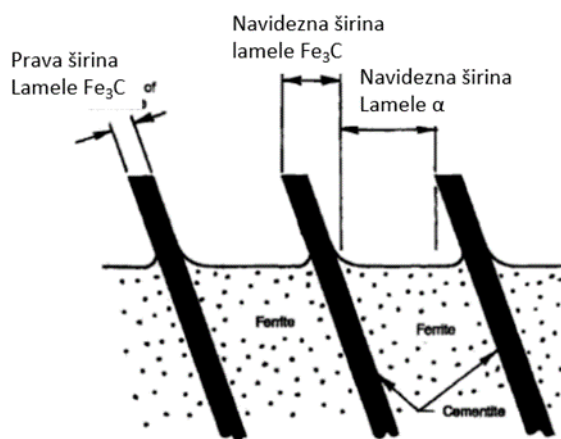
Vzorci smo si pobliže ogledali že takoj po obdelavi in takrat smo gledali skozi svetlobni mikroskop; tam se velike razlike med kaljenim in kaljenim ter popuščanim vzorcem ni videlo, le normaliziran se je razlikoval, zelo dobro so se videle lamele ferit-perlit. Nato smo počakali, da se vzorci posušijo, in si jih ogledali še na vrstičnem elektronskem mikroskopu SEM, kjer so se videle razlike med vsemi tremi vzorci jekla. Martenzit je sestavljen iz drobnih letvic, ki so bolj ali manj naključno orientirane. Karbidnih izločkov se zaradi majhnosti na svetlobnem mikroskopu pri popuščnem vzorcu ne vidi, na SEM pa. Na svetlobnem mikroskopu je pri normaliziranih vzorcih ferit svetel v obliki kristalnih zrn, perlit pa temnejši, ker se svetloba na cementitnih lamelah razprši. Lamele se težko ločijo, ker je ločljivost svetlobnega mikroskopa premajhna. Lepo pa se le-te opazijo na SEM. Tukaj pa je ferit temnejši, cementitne lamele pa svetlejše. Na popuščnem martenzitu pa so opažene drobne svetle pike – karbidni izločki, ki so nastali pri popuščanju.



Slika 14: Kaljeno jeklo skozi svetlobni mikroskop, 1000-kratna povečava (martenzit)

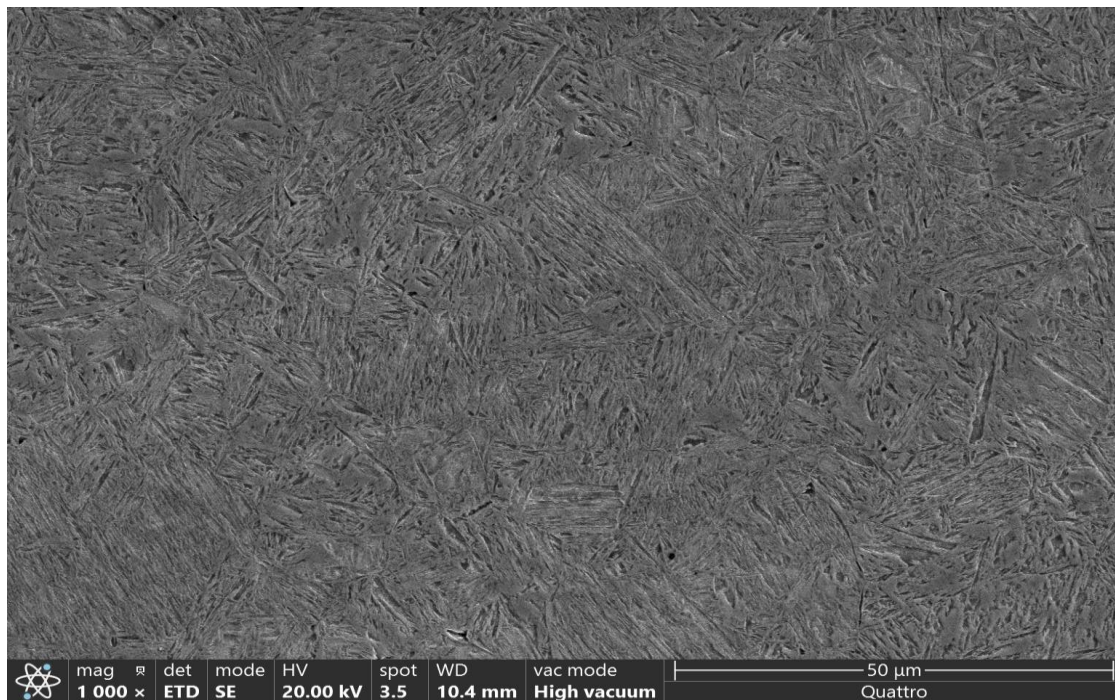


Slika 15: Normalizirano jeklo skozi svetlobni mikroskop, 1000-kratna povečava (ferrit in perlit)

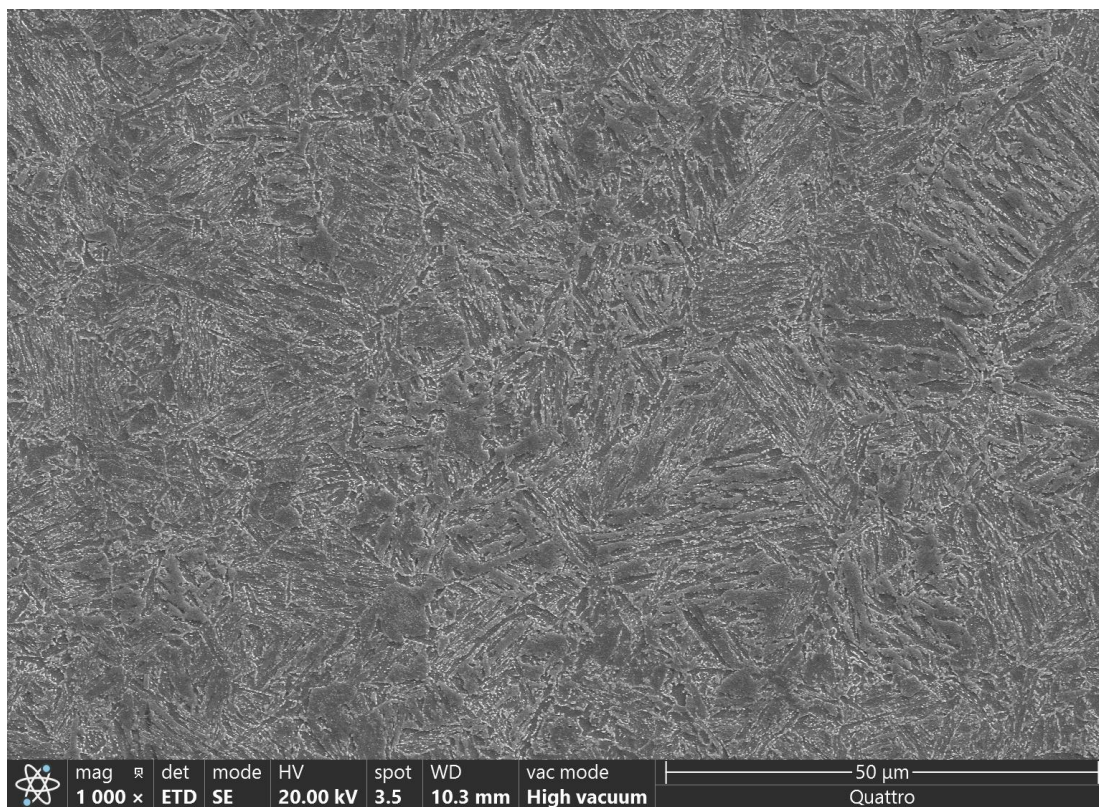


Slika 16: Shematski prikaz perlita od strani

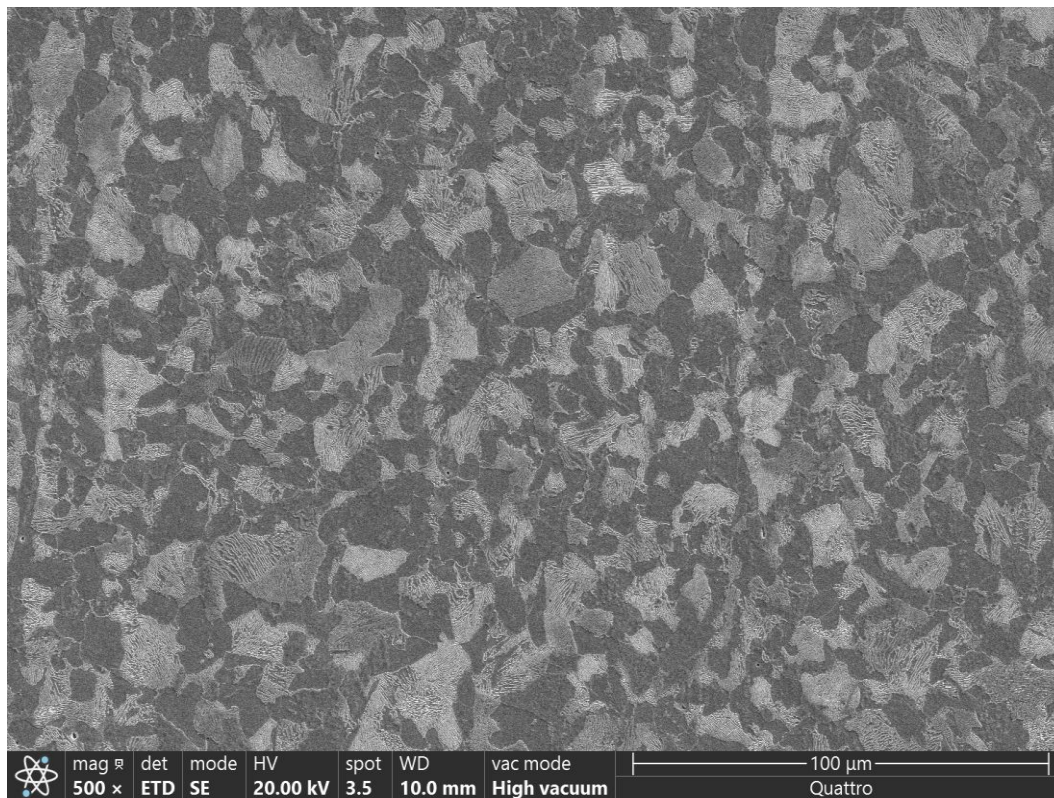
DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Vpliv toplotne obdelave na mikrostrukturo in fizikalne lastnosti jekla: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2023



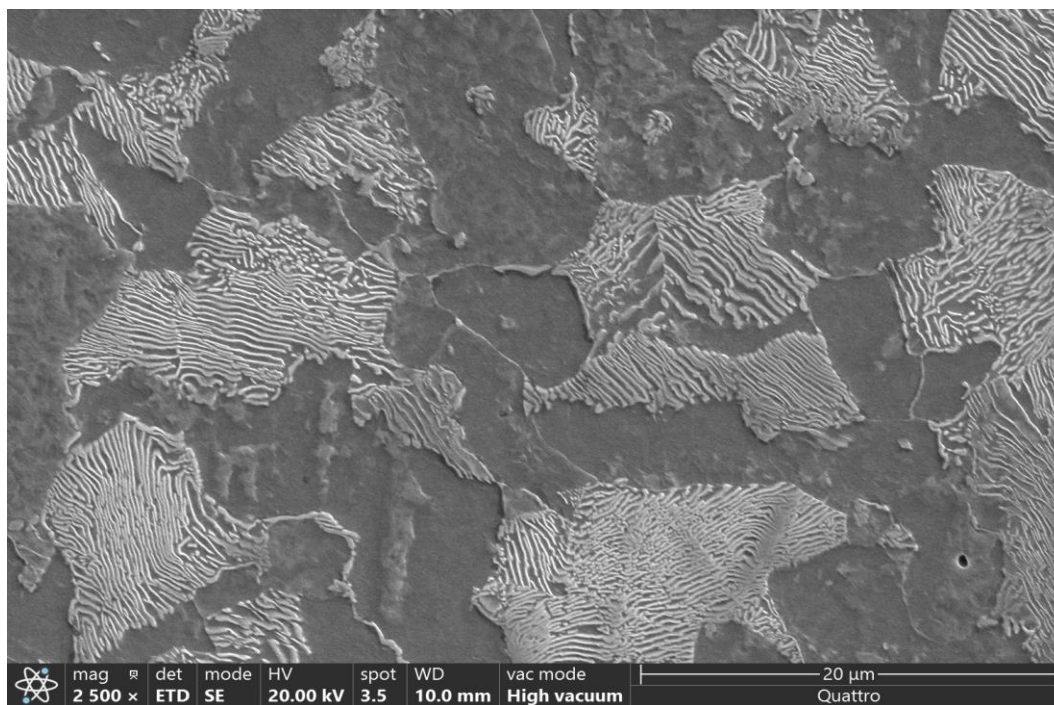
Slika 17: Kaljeno jeklo pod elektronskim mikroskopom, 1000-kratna povečava (martenzit)



Slika 18: Kaljeno in popuščano jeklo pod elektronskim mikroskopom, 1000-kratna povečava (popuščen martenzit – vidijo se karbidni delci v martenzitu)



Slika 19: Normalizirano jeklo pod elektronskim mikroskopom, 500-kratna povečava (ferit in perlit)



Slika 20: Normalizirano jeklo pod elektronskim mikroskopom, 2500-kratna povečava (ferit in lamelni perlit)

3.3.6 Preizkus toplotne prevodnosti vzorcev

Za preizkus toplotne prevodnosti smo uporabili napravo Hot disk TSP 2200. Z napravo je upravljal profesor, ki je vpel vzorce v napravo, ta pa jih je ustrelila s temperaturnim valom na eni strani in odčitala prevodnost na drugi strani. To merjenje smo ponovili na treh stopnjah moči za vsak vzorec, dodali smo tudi kontrolo, da smo lahko kalibrirali Hot disk TPS 2200. V sobi je morala biti stalna temperatura, da senzor ne bi začutil vseh sprememb, ki bi se drugače dogajale, in zaradi tega lahko meritve ne bi bile tako natančne.

Row	Status	Description	Heating Power	Measurement Time	Sam...	Senso...	Thermal Conductivity
0	Calcul...	C45 - noraliz...	750 mW	5s	23 °C	5501	43,04 W/mK
1	Calcul...	C45 - norma...	1W	5s	23 °C	5501	44,58 W/mK
2	Calcul...	C45 - norma...	1,5W	5s	23 °C	5501	44,30 W/mK

Slika 21: Toplotna prevodnost normaliziranega jekla C45

Row	Status	Description	Heating Power	Measurement Time	Sam...	Senso...	Thermal Conductivity
0	Calcul...	CK45 - kalje...	1W	5s	23 °C		33,89 W/mK
1	Calcul...	CK45 - kalje...	1,2W	5s	23 °C		33,54 W/mK
2	Calcul...	CK45 - kalje...	1,5W	5s	23 °C		33,88 W/mK

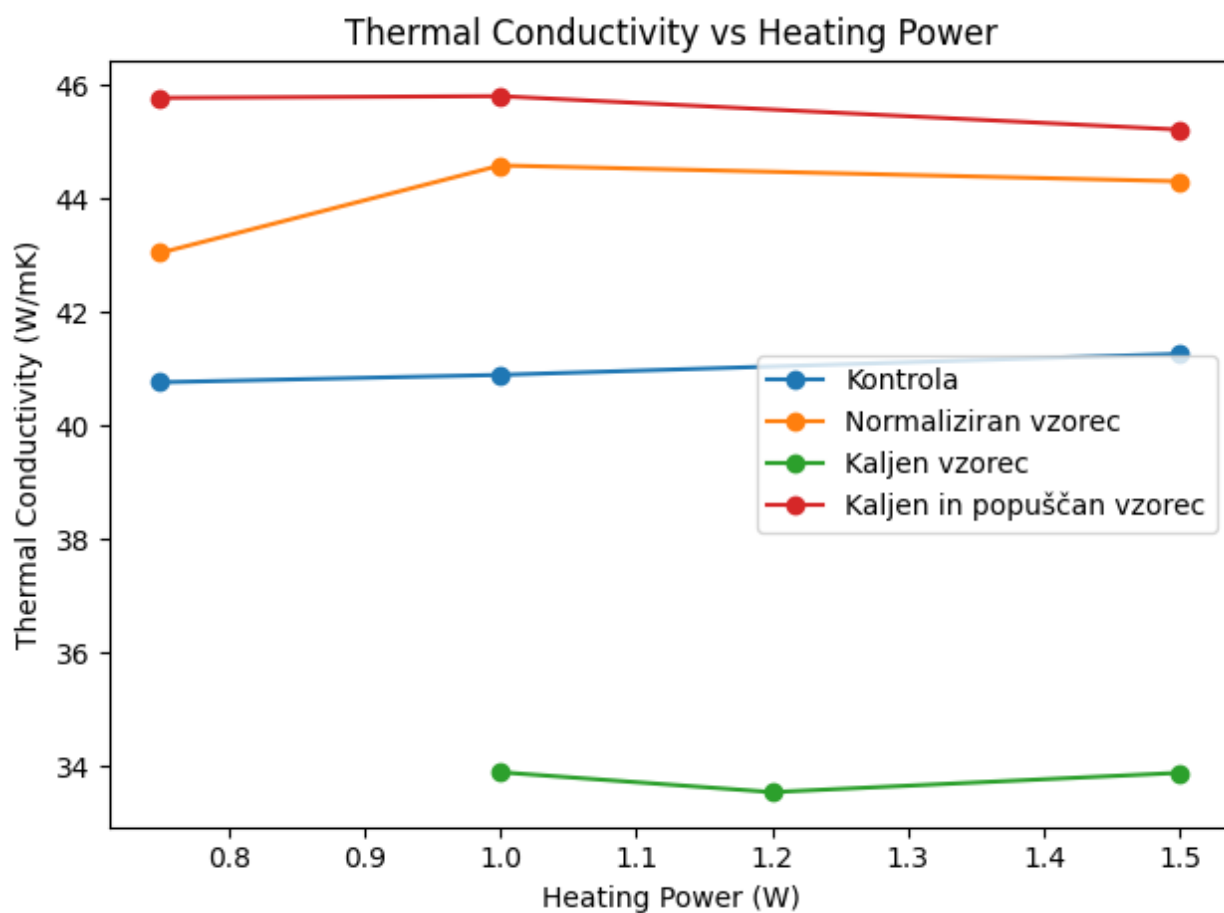
Slika 22: Toplotna prevodnost kaljenega jekla C45

Row	Status	Description	Heating Power	Measurement Time	Sam...	Senso...	Thermal Conductivity
0	Calcul...	C45 poboljš...	750 mW	5s	23 °C	5501	45,77 W/mK
1	Calcul...	C45 poboljš...	1W	5s	23 °C	5501	45,80 W/mK
2	Calcul...	C45 poboljš...	1,5W	5s	23 °C	5501	45,21 W/mK

Slika 23: Toplotna prevodnost kaljenega ter popuščene jekla C45

Row	Status	Description	Heating Power	Measurement Time	Sam...	Senso...	Thermal Conductivity
0	Calcul...	C45 palica_1	500 mW	5s	22 °C		40,92 W/mK
1	Calcul...	C45 palica_2	750 mW	5s	22 °C		40,76 W/mK
2	Calcul...	C45 palica_3	1W	5s	22 °C		40,89 W/mK
3	Calcul...	C45 palica_4	1,5W	5s	22 °C		41,26 W/mK

Slika 24: Prevodnost toplotno neobdelanega jekla C45



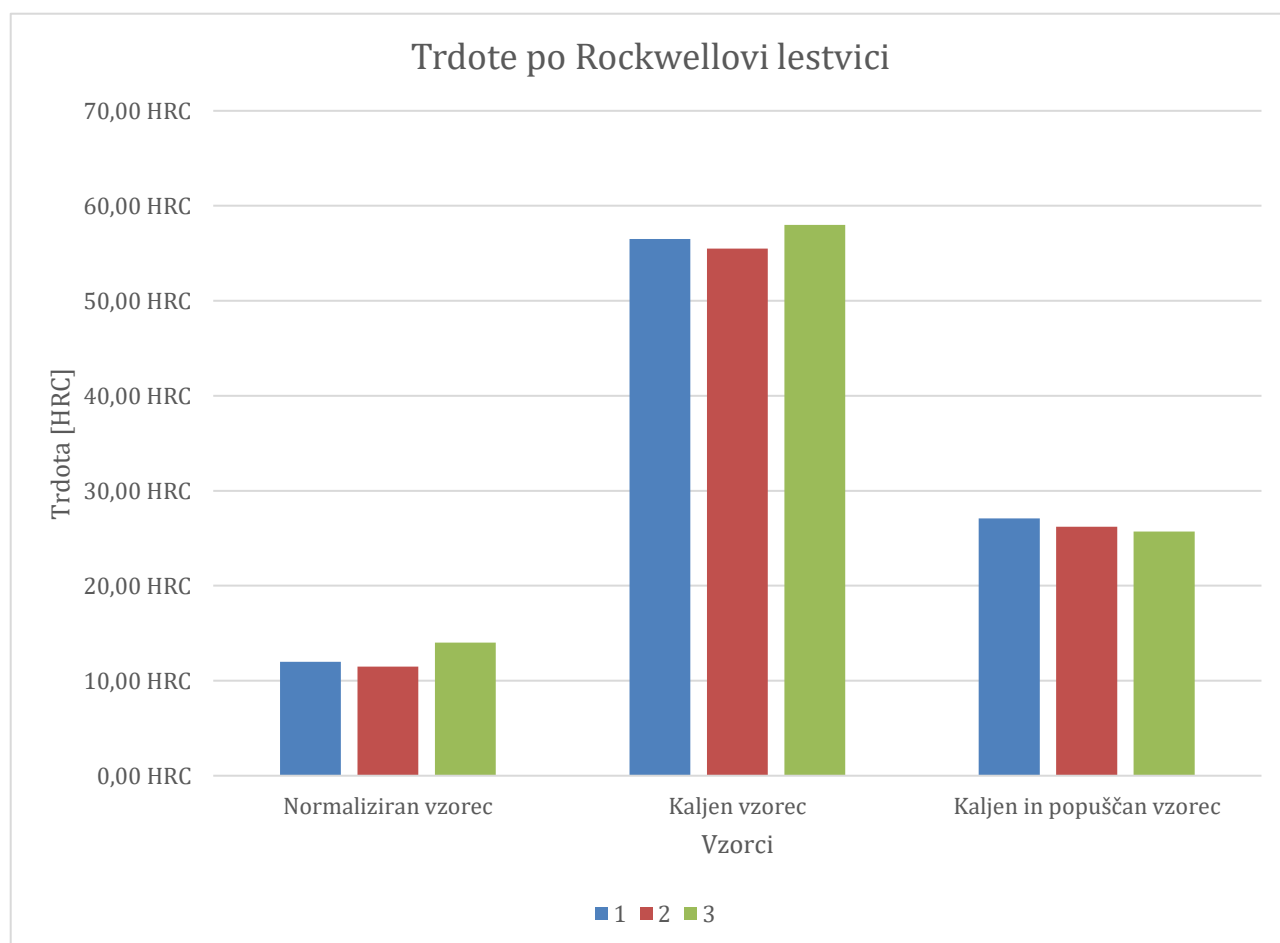
Graf 1: Toplotna prevodnost jekla v odvisnosti od grelne moči

3.4 Razprava in rezultati raziskave

Rezultati raziskav kažejo, da so imeli vzorci jekla C45 različne stopnje trdote, merjene na Rockwellovi in Vickersovi lestvici.

Prvi vzorec je imel območje trdote 11,5–14 HRC in 200 HV, drugi vzorec je imel območje 55,5–58 HRC in 636 HV, tretji vzorec pa je imel območje 25,7–27,1 HRC in 283 HV.

Ti rezultati kažejo, da je toplotna obdelava povzročila različne mikrostrukturne in posledično različne mehanske lastnosti; to potrjuje našo prvo in tretjo tezo, saj se vsi vzorci kar drastično razlikujejo – razlika v trdoti po Rockwellu je skoraj 100 % v vseh treh primerih.



Graf 2: Trdote po Rockwellovi lestvici trdote

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Vpliv toplotne obdelave na mikrostrukturo in fizikalne lastnosti jekla: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2023

Tabela 2: Trdote po Vickersovi lestvici

Vzorec	Meritev
Normaliziran	200 HV
Kaljen	636 HV
<u>Kaljen in popuščan</u>	283 HV

Ko smo s Hot Disk TPS 2200 izmerili toplotno prevodnost, smo dobili sledeče rezultate.

Tabela 3: Rezultati toplotne prevodnosti

Vzorec	Moč ogrevanja (W)	Toplotna prevodnost (W/mK)
Normaliziran	0.75	43.04
Normaliziran	1	44.58
Normaliziran	1.5	44.3
Kaljen	1	33.89
Kaljen	1.2	33.54
Kaljen	1.5	33.88
<u>Kaljen in popuščan</u>	0.75	45.77
<u>Kaljen in popuščan</u>	1	45.8
<u>Kaljen in popuščan</u>	1.5	45.21

Rezultati kažejo, da se je toplotna prevodnost prvega vzorca povečevala z večanjem grelne moči, medtem ko je toplotna prevodnost drugega vzorca ostala relativno konstantna, toplotna prevodnost tretjega vzorca pa se je z večanjem grelne moči nekoliko zmanjšala. Ob tem lahko ovržemo drugo tezo, saj vidimo razlike v rezultatih, kar nam pove, da lahko na toplotno prevodnost vzorcev vplivajo tudi njihove mikrostrukture in postopki toplotne obdelave.

Na splošno rezultati raziskovalne naloge zagotavljajo dragocene informacije o mikrostrukturah in mehanskih lastnostih jekla C45 ter o tem, kako lahko nanje vplivajo različni postopki toplotne obdelave.

4. ZAKLJUČEK

V raziskovalni nalogi smo izvedeli veliko novega in razrešili vprašanja, ki so se nam ob podani teoriji porajala, spoznali smo spremembe v mikrostrukturi in spremembe fizikalnih lastnosti pri toplotni obdelavi jekel.

V zaključku lahko še zapišemo, kakšne so naše ugotovitve v zvezi z našimi hipotezami.

- Različna hitrost ohlajanja vpliva na mikrostrukturo jekla.

Prvo hipotezo smo potrdili že pri prvem ogledu vzorcev skozi svetlobni mikroskop, kjer smo že pri 500-kratni povečavi videli razlike v mikrostrukturi različnih vzorcev. Z različnimi toplotnimi obdelavami smo dobili: feritno-perlitno mikrostrukturo, martenzitno mikrostrukturo in popuščeno martenzitno mikrostrukturo s karbidnimi delci.

- Ob toplotni obdelavi se toplotna prevodnost ne spremeni.

To hipotezo lahko ovržemo, saj smo pri merjenju toplotne prevodnosti opazili razlike v meritvah za vse tri vzorce.

- Kaljen ter kaljen in popuščan vzorec se po fizikalnih lastnostih ne bosta bistveno razlikovala.

Po mikrostrukturi se na prvi pogled s svetlobnim mikroskopom res ne razlikujeta, a ko pogledamo mikrostrukturo pod elektronskim mikroskopom ter ko izmerimo trdoto in toplotno prevodnost, vidimo res velike razlike. V fizikalnih lastnostih je popuščen martenzit bolj podoben jeklu po normalizaciji s feritno-perlitno mikrostrukturo kot kaljenemu vzorcu z martenzitno mikrostrukturo. Namreč, martenzitna mikrostruktura je neravnotežna mikrostruktura s prisilno raztopljenjenim ogljikom, ki močno vpliva na toplotno prevodnost (zmanjša). Zato martenzit pri popuščanju zaradi dovolj visoke toplotne energije razpada v ferit in cementit (Fe_3C), ki sta do 727°C ravnotežni mikrostrukturi. In ravno to se dogaja pri popuščanju, čeprav proces v našem primeru še ni popolnoma končan, saj je bila temperatura 600°C prenizka in čas prekratek. Se pa je ogljik vseeno iz prenasičenega

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Vpliv toplotne obdelave na mikrostrukturo in fizikalne lastnosti jekla: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2023

martenzita že izločil, zato so nastali karbidni izločki v osnovi, ki je še vedno po morfologiji podoben martenzitu, po fizikalnih lastnostih pa že feritu. To nam pove, da moramo svojo hipotezo zagotovo ovreči.

4.1 Zahvale

Iskreno se zahvaljujemo profesorici dr. Sonji Kitak iz Gimnazije Jožeta Plečnika Ljubljana, profesorju Dr. Alešu Nagodetu, asistentu Matiji Zorcu in vsem ostalim, ki so pripomogli k nastanku naloge, za njihovo neprecenljivo vodenje, podporo in strokovno znanje med našim raziskovalnim delom.

Njihovi vpogledi in povratne informacije so bili ključni pri oblikovanju naše metodologije, analize in zaključkov.

Za njihov čas, potrpežljivost in predanost smo jim resnično hvaležni in počutimo se počaščeni, da smo imeli priložnost sodelovati s tako uglednimi ljudmi.

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Vpliv toplotne obdelave na mikrostrukturo in fizikalne lastnosti jekla: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2023

5. Viri

- Beni Tehing. BENI TEHING. (n.d.). <https://www.benitehing.si/kalienje/> Pridobljeno: 26.2.2023
- *Special Steels - Carbon Steel, Alloy Steel, Free Cutting, etc - RINL VSP MS IS2062 SAE:1018 AISI:1018 15C8 070M20 Rounds Bars Manufacturer from Nagpur.* (n.d.). <https://www.econetting.com/special-steels-carbon-steel-alloy-steel-free-cutting-etc.html> Pridobljeno: 26.2.2023
- Hot Disk AB. (2022, November 7). *Products & Services - Hot Disk.* Hot Disk. <https://www.hotdiskinstruments.com/products-services/#sensors> Pridobljeno: 26.2.2023
- Hot Disk AB. (2022a, October 26). *TPS 2200 - Instruments - Hot Disk.* Hot Disk. <https://www.hotdiskinstruments.com/products-services/instruments/tps-2200/> Pridobljeno: 21.2.2023
- *Mild Steel - Round Bar.* (n.d.). https://www.engineeringtoolbox.com/mild-steel-rounds-d_1795.html Pridobljeno: 21.2.2023
- Wikimedie, S. P. (2022, October 17). *Jeklo.* Wikipedija, Prosta Enciklopedija. <https://sl.wikipedia.org/wiki/Jeklo> Pridobljeno: 23.2.2023
- *Stainless Steel | Cut-to-Size Stainless Steel | Metal Supermarkets.* (n.d.). Metal Supermarkets. <https://www.metalsupermarkets.com/metals/stainless-steel/> Pridobljeno: 21.2.2023
- *Vickers hardness test-HV-test method.* (n.d.). http://www.matsuzawa-ht.com/us/image/obj/item/m_vick/m_vick_image.png Pridobljeno: 21.2.2023
- Ltd, Z. Z. I. C. (2019, April 17). *Jekla toplotna obdelava načine in namene - znanje - unije zmago (HK) Industry Co., Ltd. Zveza Zmage (HK) Industry Co, Ltd.*

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Vpliv toplotne obdelave na mikrostrukturo in fizikalne lastnosti jekla: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2023

<http://si.victorysteelpipe.com/info/common-steel-heat-treatment-methods-and-purpos-34751946.html> Pridobljeno: 21.2.2023

- *Everhart-Thornley (ET) detector - Practical Electron Microscopy and Database - An Online Book - EELS EDS TEM SEM.* (n.d.).

<https://www.globalsino.com/EM/page4584.html> Pridobljeno: 21.2.2023

- *Znanstveno raziskovalno središče Bistra Ptuj* (n.d.). ZRS Bistra, Ptuj.

https://bistra.si/images/raziskovalne-naloge/Priro%C4%8Dnik_z_navodili_za_iz%20%20%20delavo_raziskovalne_naloge.pdf Pridobljeno: 15.2.2023

- *nglos324 - martensite.* (n.d.).

<https://www.princeton.edu/~maelabs/mae324/glos324/martensite.htm> Pridobljeno: 24.2.2023

- Tend, O. (n.d.). *SEM*. IMT. <https://www.imt.si/organizacijske-enote/znanstveno-raziskovalne-organizacijske-enote/odsek-za-fiziko-in-kemijo-materialov/laboratorij-za-metalografijo/sem> Pridobljeno: 24.2.2023

- *Fundamentals of the Heat Treating of Steel.* (n.d.).

<https://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/ACF180B.pdf> Pridobljeno: 24.2.2023

- *Transformation Diagrams (CCT & TTT).* (n.d.).

<https://steelselector.sij.si/help/testing/ttt.html> Pridobljeno: 21.2.2023

- Wikipedia contributors. (2023, February 21). *Thermal conduction*. Wikipedia.

https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_conduction Pridobljeno: 21.2.2023

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Vpliv toplotne obdelave na mikrostrukturo in fizikalne lastnosti jekla: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2023

- Connor, N. (2019, June 4). *What is Fourier's Law of Thermal Conduction - Definition*. Thermal Engineering. <https://www.thermal-engineering.org/what-is-fouriers-law-of-thermal-conduction-definition/> Pridobljeno: 14.2.2023
- The Editors of Encyclopaedia Britannica. (1998, July 20). *Vickers hardness | mineralogy*. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/Vickers-hardness> Pridobljeno: 14.2.2023
- Wente, E. F., Nutting, J., & Wondris, E. (1999, July 26). *Steel | Composition, Properties, Types, Grades, & Facts*. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/technology/steel> Pridobljeno: 14.2.2023
- *Metallurgy | Definition & History*. (2023b, February 10). Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/metallurgy/Hardening-treatments#ref622743> Pridobljeno: 23.2.2023
- *Mineral | Types & Uses*. (2023, February 3). Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/mineral-chemical-compound/Hardness> Pridobljeno: 23.2.2023
- The Editors of Encyclopaedia Britannica. (1998a, July 20). *Hardness tester | device*. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/technology/hardness-tester> Pridobljeno: 11.2.2023
- The Editors of Encyclopaedia Britannica. (2023, January 8). *Heat | Definition & Facts*. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/heat> Pridobljeno: 11.2.2023

DEMŠAR, Anže. OKORN, Anej. ŽAGAR, Anžej. Vpliv toplotne obdelave na mikrostrukturo in fizikalne lastnosti jekla: Raziskovalna naloga, Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana, 2023

- Coker, A. K. (2015b, January 1). *Metallurgy – Corrosion*.
<https://doi.org/10.1016/b978-0-08-094242-1.00022-x> Pridobljeno: 26.2.2023
- The Editors of Encyclopaedia Britannica. (2023b, February 10). *Heat transfer | Definition & Facts*. Encyclopedia Britannica.
<https://www.britannica.com/science/heat-transfer> Pridobljeno: 14.2.2023