

# Razvoj numeričkog modela za procjenu tvrdoće čeličnog uzorka nakon kaljenja

---

Kukuljan, Ema

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:874967>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-19**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**RAZVOJ NUMERIČKOG MODELA ZA PROCJENU TVRDOĆE  
ČELIČNOG UZORKA NAKON KALJENJA**

Rijeka, svibanj 2024.

Ema Kukuljan

0069083991

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**RAZVOJ NUMERIČKOG MODELA ZA PROCJENU TVRDOĆE  
ČELIČNOG UZORKA NAKON KALJENJA**

Mentori:

Prof. dr. sc. Robert Basan

Doc. dr. sc. Jelena Srnec Novak

Rijeka, svibanj 2024.

Ema Kukuljan

0069083991

Rijeka, 15. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za konstruiranje u strojarstvu**  
Predmet: **CAE u razvoju proizvoda**  
Grana: **2.11.01 opće strojarstvo (konstrukcije)**

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Emma Kukuljan (0069083991)**  
Studij: **Sveučilišni diplomski studij strojarstva**  
Modul: **Konstruiranje i mehatronika**

Zadatak: **Razvoj numeričkog modela za procjenu tvrdoće čeličnog uzorka nakon kaljenja / Development of a numerical model for the estimation of the hardness of steel specimen after hardening**

### Opis zadatka:

U okviru diplomskog rada potrebno je razviti numerički model temeljen na metodi konačnih elemenata koji treba omogućavati simulaciju ohlađivanja uzoraka tijekom kaljenja. Putem dobivenih krivulja ohlađivanja u različitim točkama čeličnog uzorka do karakteristične temperature procijeniti njihovu tvrdoću. Prethodno provesti istraživanje teme i dati kritički osvrt postojećih pristupa i modela. Provesti kalibraciju numeričkog modela za odabrane rashladne medije i geometrije odnosno dimenzije ispitnih uzoraka. Razvijeni model validirati korištenjem podataka i rezultata iz literature ili neki drugi način. U radu koristiti programski paket ANSYS.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.



Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:

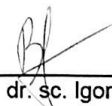


Prof. dr. sc. Robert Basan



Doc. dr. sc. Jelena Srnc Novak  
(komentor)

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:



Izv. prof. dr. sc. Igor Bonefačić

## **Izjava**

Izjavljujem da sam diplomski rad „Razvoj numeričkog modela za procjenu tvrdoće čeličnog uzorka nakon kaljenja“ izradila samostalno, koristeći znanje stečeno tijekom studija te koristeći navedenu literaturu pod stručnim vodstvom mentora prof. dr. sc. Roberta Basana i komentorice doc. dr. sc. Jelene Srnec Novak.

## **Zahvala**

Ovim se putem želim zahvaliti mentoru prof. dr. sc. Robertu Basanu i komentorici doc. dr. sc. Jeleni Srnec Novak što su mi omogućili priliku za izvođenje diplomskog rada te kroz cijeli proces vrlo ažurno pružali stručno vodstvo popraćeno korisnim savjetima. Također se želim zahvaliti izv. prof. dr. sc. Dariu Iljkiću koji je susretljivo ponudio znanje i savjete iz područja svoje ekspertize.

Beskrajno sam zahvalna osobi koja je sa mnom na ovom putu od prvog dana. Osobi koja je bila oslonac i podrška tijekom mog rasta, koja mi je dokazala čega sam sve sposobna.

Josip, hvala ti!

Riječima ne mogu opisati zahvalnost koju osjećam za svoju obitelj i prijatelje, koji su bili nevjerojatna podrška tokom godina studiranja. Motivacija da uvijek dam sve od sebe, bio je ponos na vašim licima.

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. KALJENJE .....	2
2.1. Uvod u toplinsku obradu.....	2
2.2. Mikrostrukturne pretvorbe u čeliku tijekom kaljenja .....	3
2.2.1. Tvorba austenita.....	4
2.2.2. Pretvorba austenita u perlit .....	6
2.2.3. Pretvorba austenita u martenzit.....	7
2.2.4. Pretvorba austenita u bainit.....	8
2.3. TTT dijagrami .....	9
3. PROKALJIVOST I ZAKALJIVOST .....	12
3.1. Procjena prokaljivosti pomoću TTT dijagrama .....	13
3.2. Procjena prokaljivosti pomoću Jominyjevog pokusa .....	13
3.3. Procjena prokaljivosti pomoću numeričke analize .....	14
4. ANALIZA PROCESA GAŠENJA .....	17
4.1. Opis procesa gašenja.....	17
4.2. Parametri odvođenja topline .....	19
4.2.1. Gustoća materijala uzorka.....	21
4.2.2. Specifični toplinski kapacitet.....	22
4.2.3. Koeficijent provođenja topline .....	23
4.2.4. Koeficijent prijelaza topline.....	24
5. RAZVOJ NUMERIČKOG MODELA .....	27
5.1. Teorijske osnove metode konačnih elemenata.....	29
5.2. Definiranje numeričkog modela .....	30
5.2.1. Definiranje vrste numeričke analize .....	30
5.2.2. Definiranje geometrije prema referentnim uzorcima.....	31
5.2.3. Definiranje mreže konačnih elemenata.....	33

5.2.4.	Definiranje svojstava materijala .....	35
5.2.5.	Definiranje opterećenja i rubnih uvjeta.....	36
6.	REFERENTNE KRIVULJE OHLAĐIVANJA .....	39
7.	KALIBRACIJA NUMERIČKOG MODELA SA STACIONARNIM KOEFICIJENTOM PRIJELAZA TOPLINE .....	42
7.1.	Prva iteracija – Dobivene krivulje ohlađivanja za stacionarni koeficijent $\alpha$ .....	42
7.2.	Druga iteracija – Dobivene krivulje ohlađivanja za stacionarni koeficijent $\alpha$ .....	44
8.	KALIBRACIJA NUMERIČKOG MODELA SA NESTACIONARNIM KOEFICIJENTOM PRIJELAZA TOPLINE .....	47
8.1.	Prva iteracija – Dobivene krivulje ohlađivanja za varijabilni koeficijent $\alpha$ .....	47
8.2.	Druga iteracija – Dobivene krivulje ohlađivanja za varijabilni koeficijent $\alpha$ .....	51
8.3.	Treća iteracija – Dobivene krivulje ohlađivanja za varijabilni koeficijent $\alpha$ .....	53
8.4.	Validacija krivulja ohlađivanja za uzorke različitih dimenzija .....	56
9.	VERIFIKACIJA RAZVIJENOG MODELA NA TEMELJU PROCIJENJENIH VRIJEDNOSTI TVRDOĆE .....	61
9.1.	Opis postupka određivanja tvrdoće.....	61
9.2.	Opis referentnog uzorka Ø90x200 iz 42CrMo4 .....	63
9.3.	Izrada numeričkog modela prema referentnom uzorku .....	66
9.4.	Verifikacija postignute tvrdoće numeričkog modela .....	68
10.	ZAKLJUČAK .....	73
11.	LITERATURA .....	74
12.	POPIS OZNAKA.....	75
13.	POPIS SLIKA.....	76
14.	POPIS TABLICA.....	78
15.	SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI.....	79
16.	SUMMARY AND KEY WORDS .....	80
17.	PRILOG .....	81



## 1. UVOD

U diplomskom radu prati se razvoj numeričkog modela za procjenu tvrdoće čeličnog uzorka nakon kaljenja. Provodi se nestacionarna toplinska numerička analiza u programskom paketu *ANSYS Mechanical*. Analiza je temeljena na metodi konačnih elemenata te služi za simulaciju ohlađivanja čeličnog uzorka tokom procesa gašenja.

Razvoju numeričkog modela za procjenu tvrdoće nakon kaljenja prethodi detaljna analiza procesa kaljenja. Definiiraju se ključni termini procesa kaljenja, kao i općenito toplinske obrade. Proučavaju se mikrostrukturne pretvorbe u čeliku kojima se kod kaljenja postiže veća tvrdoća. Analiziraju se ključni parametri odvođenja topline kod procesa gašenja kojima se definira numerički model za simulaciju hlađenja.

Analizom utjecajnih parametara kojima se opisuje odvođenje topline kod procesa gašenja, uviđa se nestacionarnost koeficijenta prijelaza topline. Raspodjela vrijednosti koeficijenta prijelaza topline nepoznanica je koja se izradom numeričkog modela iterativno kalibrira do postizanja zadovoljavajućih rezultata. Kalibracija se provodi na način da se krivulje ohlađivanja koje su rezultat postavljene numeričke analize uspoređuju sa referentnim krivuljama ohlađivanja iz literature. Vršiti se iterativna kalibracija dok se krivulje ohlađivanja dobivene numeričkom analizom u zadovoljavajućoj mjeri ne podudaraju sa referentnim krivuljama ohlađivanja.

Kod analize krivulja ohlađivanja ključno je vrijeme ohlađivanja određenog čvora uzorka od 800°C do 500°C budući da je upravo tim vremenom određena postignuta tvrdoća nakon kaljenja. Na temelju vremena ohlađivanja  $t_{8/5}$  koje se dobije numeričkom analizom, analitički se određuje tvrdoća korištenjem Jominy dijagrama. Za dobivenu tvrdoću vrši se verifikacija usporedbom dobivenih vrijednosti sa referentnim podacima koji su određeni eksperimentalno.

## 2. KALJENJE

U strojarstvu su strukturne komponente često izložene različitim opterećenjima uslijed kojih u njima dolazi do pojava naprezanja koje mogu dovesti do ubrzanog oštećenja i trošenja. Kako bi se izbjeglo korištenje visokokvalitetnih i skupih materijala, često se pristupa postupcima toplinske obrade jeftinijih i dostupnijih materijala, u ovom slučaju čelika.

### 2.1. Uvod u toplinsku obradu

Toplinska obrada pojam je koji podrazumijeva procese ugrijavanja slitine do karakterističnih temperatura, držanja na tim temperaturama određeno vrijeme te ohlađivanje režimom kojim se postižu željena svojstva. Smisao je toplinske obrade promijeniti svojstva slitine sa ciljem ostvarenja zahtijevanih funkcionalnih svojstva proizvoda. Na konačna svojstva slitine utječe se promjenom njene mikrostrukture što podrazumijeva promjenu vrste, veličine i oblika mikrostrukturnih sastojaka, kao i promjenu gustoće kristalnih nesavršenosti. Općenito se složeni proces toplinske obrade može razložiti na jednostavnije toplinske postupke, a to su proces ugrijavanja, držanje na maksimalnoj temperaturi te ohlađivanje. Do promjene mikrostrukture dolazi zbog težnje slitine ka stanju minimalne slobodne energije. Na određenim temperaturama slitina će poprimiti mikrostrukturu s minimalnom slobodnom energijom, odnosno sastojati će se od faza koje u tim uvjetima imaju minimalnu slobodnu energiju. [1] Toplinskom se obradom može utjecati na:

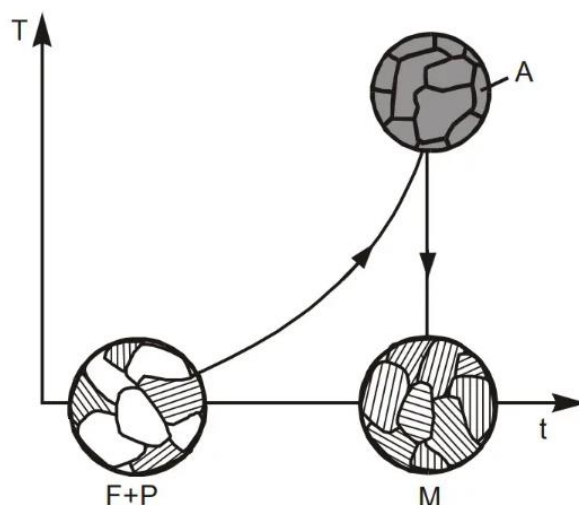
- Sastav mikrostrukture
- Veličinu i oblik mikrokonstituenata
- Gustoću kristalnih nesavršenosti
- Vlastita naprezanja
- Raspodjelu legirajućih elemenata

Mehanička svojstva čelika određena su mikrostrukturnim sastojcima od kojih se čelik sastoji. Osnova toplinske obrade zasniva se na činjenici da se promjenom mikrostrukture mijenjaju i prilagođavaju i mehanička svojstva čelika. Mikrostruktura je određena veličinom kristalnih

zrna, kristalnom strukturom, kristalnim nesavršenostima i kemijskim sastavom. Navedene stavke određuju mehanička svojstva materijala, dakle čvrstoću, tvrdoću i duktilnost. Kod metala se mikrostruktura može značajno mijenjati različitim režimima zagrijavanja i naknadnog hlađenja. Postupci toplinske obrade podrazumijevaju podvrgavanje materijala temperaturno-vremenskom ciklusu sa ciljem promjene njegove mikrostrukture. Procesima kao što su kaljenje, popuštanje i poboljšavanje nastoji se regulacijom brzine i izborom sredstva hlađenja transformirati početni materijal te ostvariti željena mehanička svojstva. [1]

## 2.2. Mikrostrukturne pretvorbe u čeliku tijekom kaljenja

U sklopu diplomskog rada, kao relevantni proces toplinske obrade, promatra se kaljenje. Kaljenje je proces toplinske obrade čelika kojim se primarno nastoji povećati njegova tvrdoća. Budući da su mehanička svojstva čelika određena njegovom mikrostrukturom, to se svojstvo kod kaljenja nastoji iskoristiti na način da se toplinskim procesima potakne stvaranje vrlo tvrde faze u mikrostrukтури. Kaljenje je postupak kojim se zagrijavanjem te naglim hlađenjem čelika nastoji dobiti čim veći udio martenzita, budući da je martenzit faza kojom se ostvaruje visoka tvrdoća čelika [1]. Na slici 2.1. prikazan je proces kaljenja sa gledišta mikrostrukturnih promjena u ovisnosti o temperaturi i vremenu. Ovim je pojednostavljenim prikazom pokazano kako u početnoj fazi u čeliku prevladavaju ferit (F) i perlit (P) te se zagrijavanjem ostvaruje austenitna (A) struktura. Gašenjem, odnosno naglim hlađenjem potom se inicira stvaranje martenzita (M) čime se izravno ostvaruje veća tvrdoća materijala.



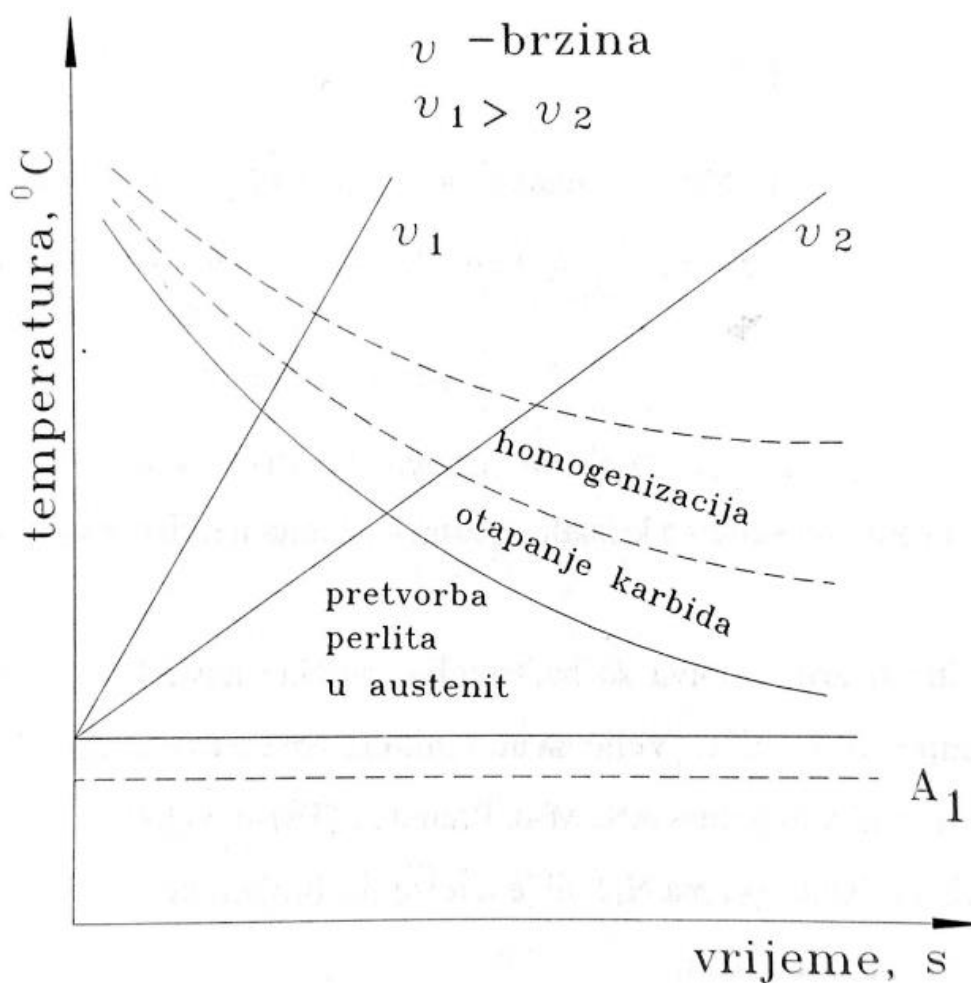
Slika 2.1. Pojednostavljeni prikaz faznih pretvorbi kod kaljenja [2]

### 2.2.1. Tvorba austenita

Austenit nastaje u trenutku kada se uslijed povišenja temperature ostvaruju termodinamički i kinetički uvjeti za tvorbu austenita iz feritno-karbidne strukture. U tom trenutku slobodna energija austenita postaje manja od slobodne energije feritno-karbidne smjeste te se uslijed te razlike mehanizmom difuzije formira austenit. Zaključno, austenitna pretvorba proces je gdje dvije faze različitih kemijskih sastava pri zadovoljavajućim uvjetima mehanizmom difuzije prelaze u treću fazu. [1]

Mjesta najpovoljnija za nastajanje austenita su na granicama feritne i cementitne faze. Tamo se najlakše pojave mjesta gdje za određenu temperaturu i kemijski sastav za područje kritične veličine austenit ima minimalnu slobodnu energiju. Nakon samog nastanka, daljnji se rast austenita ostvaruje difuzijom ugljika u novonastaloj fazi. Maksimalna koncentracija ugljika u austenitu nalazi se na granici sa karbidnom fazom, dok se minimalna nalazi na granici sa feritnom fazom.

Utvrđeno je da brzina austenitne pretvorbe ovisi o brzini difuzije ugljika kod novonastale faze. Povišenjem temperature iznad ravnotežne povećava se razlika slobodnih energija i difuzija atoma. Zbog toga se povišenjem temperature iznad ravnotežne ubrzava austenitna pretvorba. Na slici 2.2. prikazan je dijagram izotermičke tvorbe austenita pri kontinuiranim uvjetima grijanja.

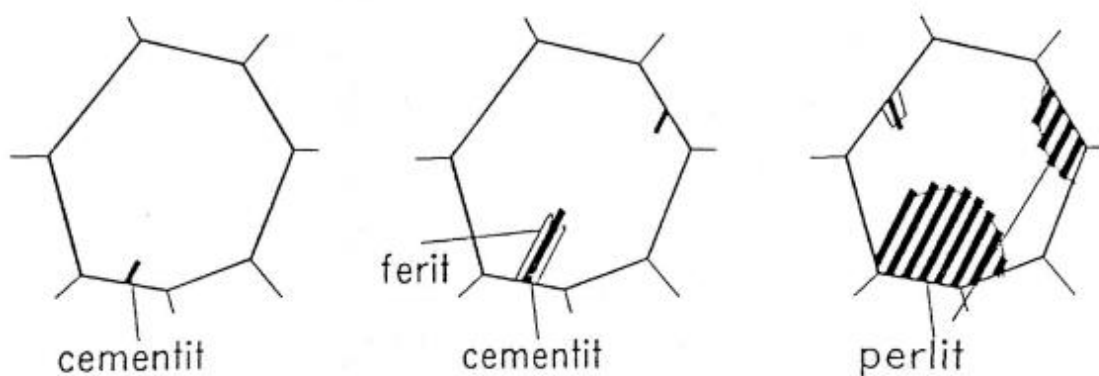


Slika 2.2. Dijagram tvorbe austenita za kontinuirano grijanje [1]

Dobivanje homogenog austenita proces je koji podrazumijeva austenitnu pretvorbu, otapanje karbida i homogenizaciju austenita. Vidljivo je da se sa povišenjem temperature ubrzava austenitna pretvorba. Kada se čelik drži na povišenim temperaturama dolazi do spontanog rasta zrna austenita. Ovisno o sklonosti rastu austenitnog zrna razlikuju se sitnozrnasti i krupnozrnasti čelici. Generalno vrijedi da čelik sa finijom strukturom ima povoljnija mehanička svojstva.

### 2.2.2. Pretvorba austenita u perlit

Ohlađivanjem čelika ispod ravnotežne temperature austenita, austenit postaje nestabilan te teži raspadu na niskotemperaturne faze. Ukoliko je ohlađivanje sporije, austenit se pretvara u perlit pri čemu dolazi do tvorbe ferita i karbida (cementita). Perlit nastaje uz potpunu difuziju atoma ugljika i atoma željeza zbog čega je potrebno za perlitnu pretvorbu zadovoljiti dovoljnu energetska nestabilnost, odnosno razliku slobodnih energija početnog austenita i konačnog perlita te dovoljnu difuziju atoma. Pri većim se ohlađenjima povećava razlika slobodnih energija, međutim smanjuje difuzija. Prikaz perlitne pretvorbe dan je na slici 2.3.



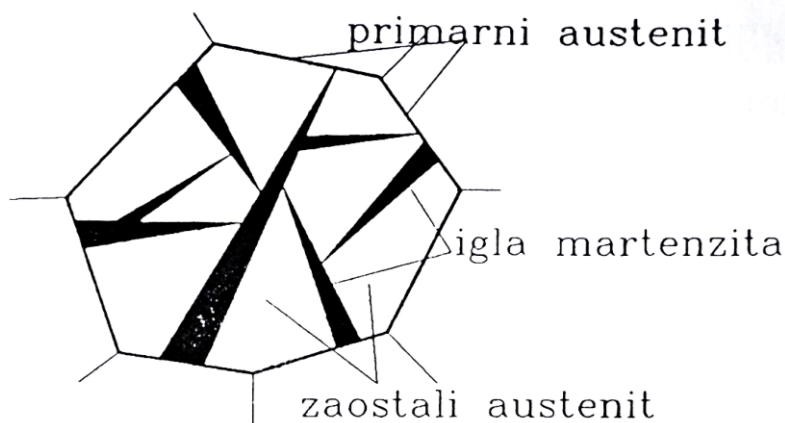
Slika 2.3. Perlitna pretvorba [1]

Klice cementita rastu prema unutarnjim slojevima austenitnog zrna, pri čemu se okolina osiromašuje ugljikom i pretvara u ferit. Budući da je ravnotežna topljivost ugljika u feritu manja od trenutne, ugljik iz ferita se potiskuje u austenitna područja koja se uslijed prezasićenja djelomično pretvaraju u cementit. Brzina perlitne pretvorbe ovisi o brzini nicanja i rasta novih faza, te o stabilnosti austenita. Za određenu temperaturu znači da perlitna pretvorba ovisi o kemijskom sastavu i homogenosti austenita, veličini zrna austenita te količini netopljenih čestica (karbida).

### 2.2.3. Pretvorba austenita u martenzit

Ustanovljeno je da ohlađivanjem čelika ispod ravnotežne temperature austenit postaje nestabilan te teži raspadu na niskotemperaturne faze. Kod dovoljno brzog hlađenja čistog željeza na temperaturi od oko 500°C se  $\gamma$ -željezo sa kubičnom plošno centriranom kristalnom rešetkom transformira u  $\alpha$ -željezo s kubičnom prostorno centriranom kristalnom rešetkom. U ovom slučaju dolazi do bezdifuzijske pretvorbe koja se naziva martenzitnom. Martenzitna pretvorba sastoji se od procesa smicanja na način da atomi iz rešetke  $\gamma$ -željeza zauzmu položaj koji odgovara kristalnoj rešetki  $\alpha$ -željeza.

Martenzit je kruta otopina ugljika u  $\alpha$ -željezu sa najviše 2,03 % ugljika [1]. Na slici 2.4. prikazana je martenzitna struktura.



Slika 2.4. Martenzitna struktura [1]

Martenzit ima veću slobodnu energiju nego li smjesa ferita i karbida, što znači da nije moguće iz smjese ferita i karbida izravno dobiti martenzit. Kako bi se dobila martenzitna struktura, kao što je to prikazano na slici 2.1., potrebno je čelik ugrijavati do pretvorbe smjese ferita i karbida u austenit. Nastali se austenit gašenjem može pretvoriti u martenzit. Procesu gašenja, dakle, mora prethoditi postupak austenitizacije čelika u svrhu dobivanja martenzitne strukture, a navedeni proces naziva se kaljenje čelika.

Kod slitina željeza i ugljika karakteristično je što se otapanjem ugljika u austenitu stabilizira  $\gamma$ -područje. Nakon procesa gašenja, na nižim temperaturama jedan dio austenita iz austenitnog područja smičnom martenzitnom pretvorbom, bezdifuzijski se transformira u martenzit. Na taj se način ostvaruje mikrostruktura koja se sastoji od martenzita i zaostalog austenita. Udio zaostalog austenita ovisi o sadržaju ugljika. Veća količina zaostalog austenita je nepoželjna.

Pretvorba austenita u martenzit ima karakterističnu temperaturu na kojoj pretvorba počinje i karakterističnu temperaturu na kojoj pretvorba završava. Karakteristične temperature ne ovise o brzini ohlađivanja, već ovise o koncentraciji ugljika i legirajućih elemenata u primarnom austenitu.

Tvrdoća martenzita ovisi o sadržaju ugljika u martenzitu. Martenzit koji ima veći udio ugljika je vrlo tvrd i krhak. Prema slici 2.5. vidljivo je da martenzit u usporedbi sa ostalim fazama ostvaruje najveću tvrdoću. Upravo zbog toga se kod kaljenja inicira stvaranje martenzita. Pri stvaranju čim većeg udjela martenzita ostvaruje se visoka tvrdoća materijala, što je i cilj procesa kaljenja.

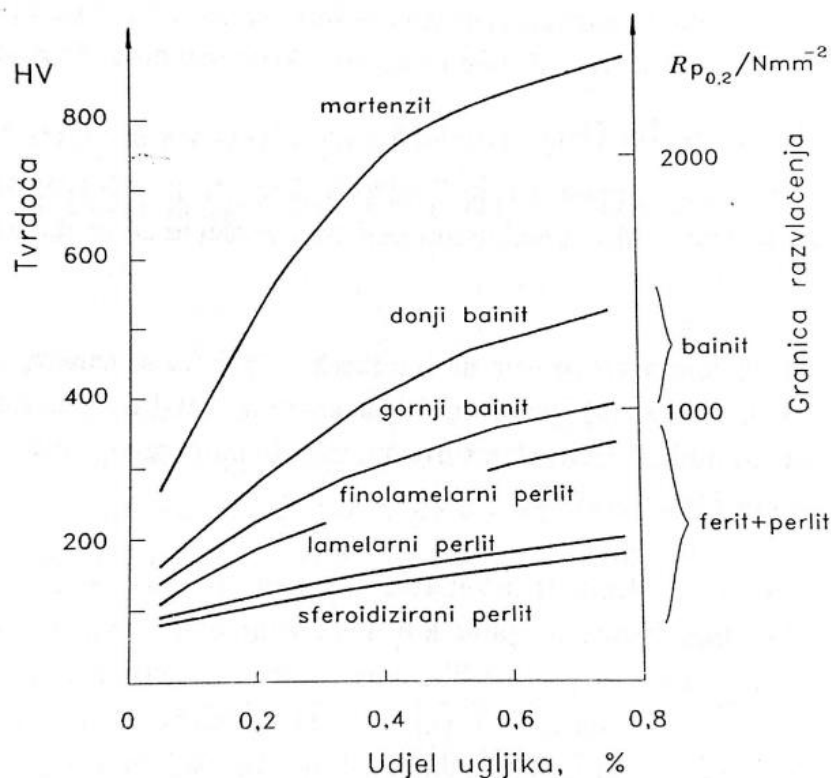
#### 2.2.4. Pretvorba austenita u bainit

Bainit je fino dispergirana smjesa prezasićenog ferita i karbida. Područje bainitne pretvorbe proteže se između područja perlitne i martenzitne pretvorbe zbog čega se bainit naziva međustupnjem. Ova međustupanjaska pretvorba dijelom se odvija difuzijskim, a dijelom bezdifuzijskim mehanizmom. Pothlađivanjem čelika dolazi do difuzijske preraspodjele ugljika u nestabilnom austenitu te se stvaraju područja s niskom i visokom koncentracijom ugljika. Kako se smanjuje udio ugljika u osiromašenom području austenita, dolazi do ostvarenja uvjeta za bezdifuzijsku tvorbu martenzita pomakom atoma. Kako je difuzija ugljika  $\alpha$ -rešetke mnogo veća od difuzije u  $\gamma$ -rešetki, dolazi do izdvajanja ugljika i formacije karbidnih čestica u prezasićenom feritu.



Mehanizam bainitne pretvorbe ne mijenja se značajno sa promjenom temperature pretvorbe. Međutim, pri nižim se temperaturama intenziviraju bezdifuzijski procesi dok kod viših temperatura dolazi do povećanja intenziteta difuzijskih procesa.

Razumijevanjem mikrostrukturnih pretvorbi u čeliku tijekom kaljenja uviđa se način na koji se kaljenjem ostvaruje veća tvrdoća. Na slici 2.5. prikazana je raspodjela tvrdoća pojedinih faza u čeliku.

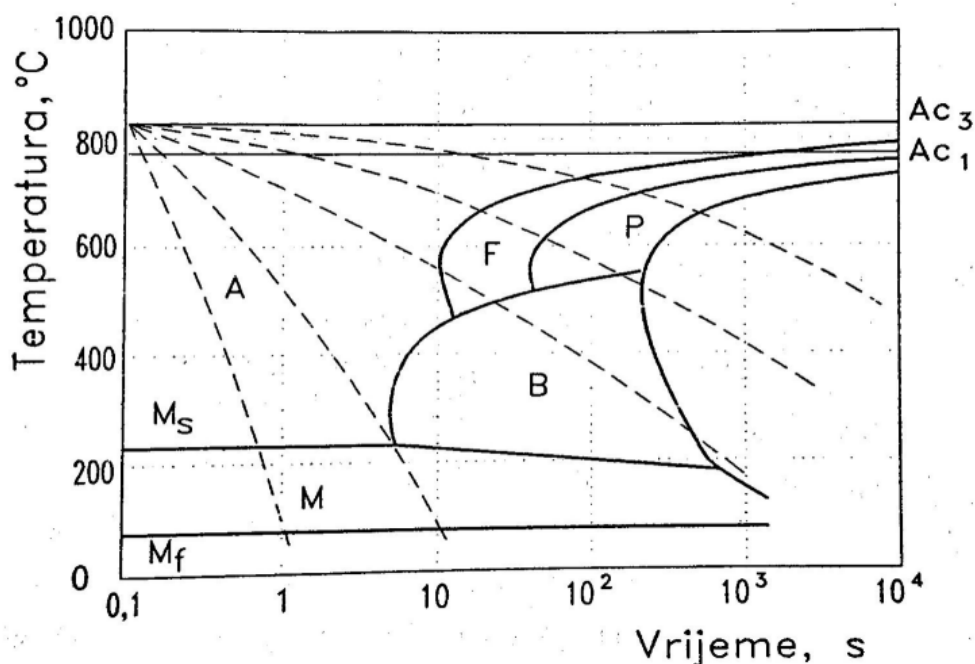


Slika 2.5. Tvrdoće faza u čeliku [1]

### 2.3. TTT dijagrami

TTT dijagram (engl. *time, temperature, transformation*) kvantitativno prikazuje fazne pretvorbe za pojedini čelik pri ohlađivanju iz austenitnog područja. Raspad austenita može se ostvariti izotermički pri čemu je temperatura za vrijeme pretvorbe u sekundarnu fazu konstantna ili pri kontinuiranim uvjetima ohlađivanja, pri čemu temperatura za vrijeme raspada kontinuirano opada. Ovisno o uvjetima raspada austenita razlikuju se dijagrami izotermičke pretvorbe i dijagrami za kontinuirano ohlađivanje.

Obzirom da se kod gašenja čelika ohlađivanje odvija u kontinuiranim uvjetima, na slici 2.6. dan je primjer TTT dijagrama podeutektoidnog čelika za kontinuirano ohlađivanje.



Slika 2.6. TTT dijagram za kontinuirano ohlađivanje [1]

Na TTT dijagramu prikazane su fazne pretvorbe za određeni čelik pri kontinuiranom ohlađivanju, pri čemu su različite krivulje ohlađivanja prikazane isprekidanom linijom. Označena područja u dijagramu na slici 2.6. su:

A – područje čistog austenita

F – područje pretvorbe austenita u primarni ferit

P – područje pretvorbe austenita u perlit

B – područje pretvorbe austenita u bajnit

M – područje pretvorbe austenita u martenzit

Kod uvjeta kontinuiranog hlađenja mijenja se temperatura raspada austenita. Uslijed toga mikrostruktura nije jednolična već je smjesa mikrostruktura visoko i niskotemperaturnog raspada austenita.

Martenzit, koji se kod kaljenja nastoji dobiti u čim većoj mjeri, može nastati samo izravno iz austenita. Prema slici 2.6. vidljivo je da je za izravan nastanak martenzita, potrebno čelik brzo

ohladiti kako krivulja hlađenja ne bi zašla u područje pretvorbi drugih faza već izravno u martenzit. Ovakav brzi postupak hlađenja naziva se gašenje čelika, te je sastavni proces kaljenja. Stvaranje martenzita započinje na početnoj temperaturi ( $M_s$ ) te završava na konačnoj temperaturi ( $M_f$ ).

Kako bi se postigla martenzitna struktura potrebno je poznavati minimalnu brzinu ohlađivanja pri kojoj se sav austenit transformira u martenzit pri čemu se izbjegava stvaranje drugih faza. Ta se brzina zove gornja kritična brzina gašenja, a u TTT dijagramu je definirana krivuljom hlađenja koja je tangenta na „nos“ krivulje početka stvaranja perlita ili bainita, što je vidljivo na slici 2.6. Donja kritična brzina gašenja definira područje gdje se u mikrostrukturi još uvijek ne pojavljuje martenzit, a važno ju je poznavati u slučajevima gdje se nastoji izbjeći stvaranje martenzita. Kritične brzine gašenja daju pregled ponašanja čelika pri gašenju, a budući da ovise o brzini perlitne pretvorbe na njih utječu sljedeći čimbenici: [1]

- kemijski sastav austenita
- veličina kristalnog zrna austenita
- homogenost kemijskog sastava austenita
- udio karbida (neotopljenih čestica)

Ovisno o promjeni navedenih čimbenika mijenja se izgled TTT dijagrama, odnosno položaj i veličina mikrostrukturnih područja. Zbog toga se TTT dijagram mora određivati zasebnim eksperimentalnim ispitivanjem za svaki čelik točno određenog kemijskog sastava i za odabranu temperaturu austenitizacije.

Pomoću TTT dijagrama moguće je odrediti udio nastalog martenzita u funkciji brzine i temperature hlađenja kao i vrstu i količinu nastalih faza. Na taj se način, TTT dijagramom može procijeniti osnovna svojstva materijala nakon kaljenja, kao što su mikrostruktura i tvrdoća. Zbog toga se TTT dijagrami primjenjuju kako bi se definirao način hlađenja i ustanovio željeni fazni sastav, odnosno svojstva materijala.

### 3. PROKALJIVOST I ZAKALJIVOST

Prokaljivost i zakaljivost su svojstva čelika koja su značajna za proces kaljenja.

- Prokaljivost je svojstvo čelika koje se odnosi na sposobnost stvaranja mikrostrukture s udjelom martenzita većim od 50% u dubljim slojevima obratka. Čelik veće prokaljivosti lakše će u dubljim slojevima formirati martenzitnu strukturu.
- Zakaljivost je svojstvo čelika kojim je definirano koliko tvrdu strukturu čelik prilikom kaljenja može ostvariti. Čelik veće zakaljivosti će ostvariti veću tvrdoću nakon kaljenja.

Kaljenje je postupak gdje se iz početne austenitne strukture čelika nastoji postići martenzitna. Udio martenzita najčešće nije 100% po cijelom volumenu obratka te je u većini slučajeva zadovoljavajući udio martenzita iznad 50%. Do toga dolazi zbog činjenice da se obradak prilikom gašenja različito hladi po slojevima od površine prema jezgri. Budući da svojstva čelika odgovaraju brzinama gašenja u tim slojevima, ostvaruju se odgovarajuće mikrostrukture ovisno o brzinama gašenja duž slojeva. Raspodjela tvrdoće u čeličnom obratku ovisi o dimenzijama obratka i sredstvu gašenja, međutim ovisi i o prokaljivosti i zakaljivosti čelika.

Minimalnu (kritičnu) dozvoljenu vrijednost tvrdoće ili martenzitne strukture koja se nastoji ostvariti propisuje inženjer, a ovisi o funkciji i primjeni čelika. Kada bi dopuštena granica prokaljivosti bila definirana sa 50% martenzita u mikrostrukturi, u tom bi slučaju kritična tvrdoća odgovarala tvrdoći čelika sa 50% martenzita. Prokaljivost čelika može se procijeniti korištenjem:

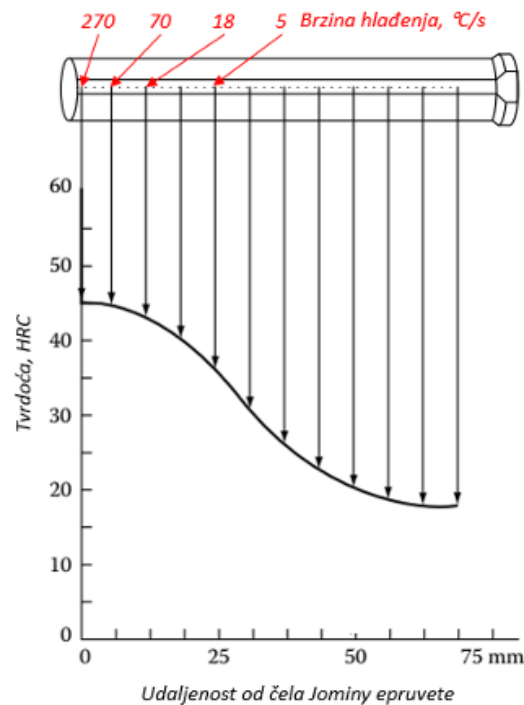
- TTT dijagrama
- Jominy pokusa
- Numeričkom analizom

### **3.1. Procjena prokaljivosti pomoću TTT dijagrama**

TTT dijagram (definiran u poglavlju 2.2.) služi za prikaz faznih pretvorbi za pojedini čelik. Na temelju ovog dijagrama može se odrediti svojstvo prokaljivosti na temelju kemijskog sastava i temperature austenitizacije. Izgled TTT dijagrama mijenja se ovisno o promjeni položaja i veličine mikrostrukturnih područja zbog čega se TTT dijagram mora posebno eksperimentalnim ispitivanjem izrađivati za svaki čelik točno određenog kemijskog sastava i za odabranu temperaturu austenitizacije. Budući da zahtjeva provedbu za točno određen materijal koji se promatra, nedostatak ove metode je relativno složen proces i visoka cijena izrade TTT dijagrama. Kako bi se izbjegla dugotrajna eksperimentalna ispitivanja, u novije se vrijeme razvija i koristi numerička analiza kao alat za predviđanje tvrdoće kod toplinske obrade.

### **3.2. Procjena prokaljivosti pomoću Jominyjevog pokusa**

Jominyjev pokus važna je metoda za procjenu prokaljivosti čelika. Šire je usvojena zbog lakše i jeftinije provedbe od procedure za dobivanje TTT dijagrama. Jominy metoda koristi se za određivanje prokaljivosti i tvrdoće čelika na temelju eksperimentalno dobivenog dijagrama na standardnoj epruveti. Kod Jominyjevog pokusa su normirani oblik i dimenzije ispitnog uzorka, uvjeti zagrijavanja, uvjeti hlađenja te mjesto i metoda ispitivanja tvrdoće. Epruveta poznatih dimenzija se zagrijava na temperaturu austenitizacije za koju se promatra prokaljivost. Nakon toga se mlazom hladi samo sa strane čela te se na završetku pokusa brusi uzdužno. Tvrdoća se zatim ispituje na različitim udaljenostima od gašenog čela te se na taj način može odrediti eksperimentalna krivulja tvrdoće u odnosu na udaljenost od čela, što je prikazano na slici 3.1.



Slika 3.1. Prikaz parametara Jominy metode [3]

Dobivena krivulja ovisnosti tvrdoće o udaljenosti od gašenog čela naziva se Jominy krivulja. Sa slike 3.1. je vidljivo da se za određeni materijal i dimenzije standarde epruvete može odrediti vrijednost tvrdoće ovisno o udaljenosti od čela, što je ujedno obilježje prokaljivosti čelika.

### 3.3. Procjena prokaljivosti pomoću numeričke analize

Razvijeni su računalni programi specijalizirani za izradu simulacija toplinskih obrada. Kombinacijom toplinske i mehaničke analize te analizom strukture materijala stvara se numerički model kojim se može ostvariti simulacija ponašanja izratka tokom različitih režima toplinske obrade te pratiti konačna svojstva za te režime. Time se izbjegava potreba da se na fizičkim komadima ispituju različiti režimi hlađenja. Prilagodбом parametara gašenja programski se može dobiti uvid u optimalne uvjete za postizanje željenih mehanička svojstva izratka.

Neki od komercijalnih programskih paketa specijaliziranih za numeričku analizu i simulaciju toplinskih postupaka obrade su:

- DANTE
- DEFORM
- FORGE
- MAGMA
- MUSIMAP
- SIMUFACT
- SYSWELD

U Tablici 3.1. dan je pregled navedenih programskih paketa, sa naznačenim područjem primjene.

*Tablica 3.1. Pregled programskih paketa za toplinsku obradu [4]*

<i>Programski paket</i>	Kaljenje	Cementiranje	Karbonitiranje	Indukcijsko kaljenje	Popuštanje
<b>DANTE</b>	+	+	-	+	+
<b>DEFORM</b>	+	+	-	+	+
<b>FORGE</b>	+	+	-	+	+
<b>MAGMA</b>	+	-	-	-	+
<b>MUSIMAP</b>	+	+	+	+	+
<b>SIMUFACT</b>	+	-	-	-	+
<b>SYSWELD</b>	+	+	+	+	+

U tablici 3.1. sa „+“ je označeno da programski paket ima mogućnost primjena za navedenu kategoriju, dok „-“ označava da unutar paketa ne postoji mogućnost analize navedene kategorije. Programski paketi koji omogućuju simulaciju toplinskih procesa sadržavaju u svojoj bazi podataka informacije o TTT dijagramima, Jominy krivuljama te specifičnostima za pojedine materijale i načine hlađenja. Programi obrađuju kompleksne podatke o materijalu te ih procesiraju ovisno o složenim međuovisnostima i zakonitostima postupaka toplinske obrade. Korisnik ne treba poznavati sve međuovisnosti i informacije koje se obrađuju, već na temelju

ulaznih parametara koje je definirao očitava vrijednosti koje ga zanimaju, poput konačne tvrdoće ili kemijskog sastava nakon toplinske obrade.

Programski paketi za numeričku analizu toplinskih procesa vrlo su kompleksni i često usko specijalizirani za primjenu u industriji. Budući da su ovakvi paketi skupi, kupnju istih potrebno je opravdati. Ne koriste se komercijalno već u poduzećima i industrijama, najčešće za specijaliziranu proizvodnju.



## 4. ANALIZA PROCESA GAŠENJA

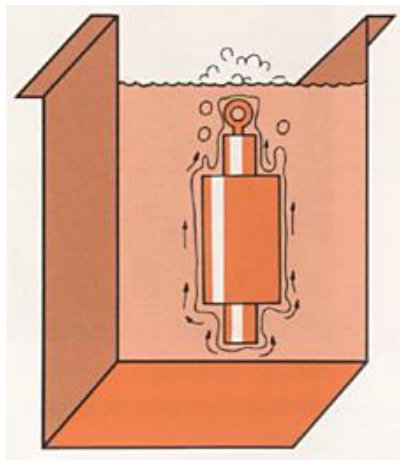
Potrebno je steći razumijevanje procesa gašenja kako bi se na dobar način moglo pristupiti razvoju numeričkog modela za simulaciju gašenja čeličnog uzorka.

### 4.1. Opis procesa gašenja

Gašenje je dio procesa kaljenja pod kojim se podrazumijeva naglo ohlađivanje ugrijanog metalnog uzorka sa ciljem ostvarenja tvrđe (martenzitne) mikrostrukture. Gašenje se provodi uranjanjem metalnog uzorka u rashladno sredstvo koje je najčešće voda, ulje ili zrak. Odabir rashladnog sredstva i režima hlađenja ovisi o materijalu uzorka i svojstvima koja se žele postići. Proces gašenja fizikalno se može podijeliti u tri faze: [5]

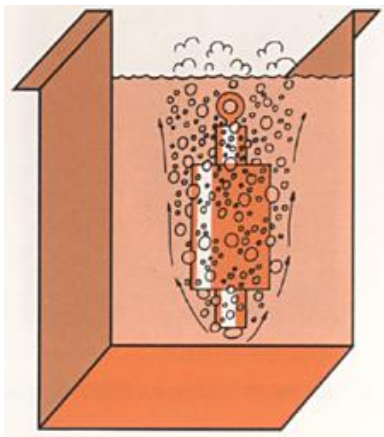
- Faza parnog omotača
- Faza vrenja
- Faza konvekcije

Prva faza gašenja je faza parnog omotača. Ova faza podrazumijeva inicijalni trenutak kada visoko zagrijani uzorak dođe u kontakt sa sredstvom hlađenja. Zbog velike razlike u temperaturi stvara se parni omotač. Faza parnog omotača prikazana je na slici 4.1.



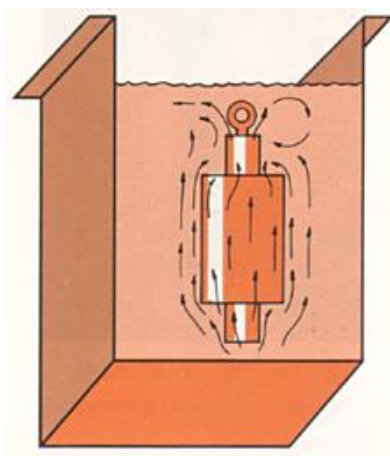
Slika 4.1. Gašenje - Faza parnog omotača [5]

Druga faza procesa gašenja je faza vrenja. Nakon smirenja eksplozivnih reakcija prve faze, dolazi do stvaranja mjehurića, odnosno vrenja rashladnog medija u području gdje dolazi u kontakt sa vrućom površinom uzorka. Nastali mjehurići se neprestano kreću prema površini, te dolazi do strujanja rashladnog sredstva. Budući da dio rashladnog sredstva koji je u izravnom kontaktu sa izratkom vrije te se uslijed razlike u gustoći pomiče na površinu, na stijenku uzorka neprestano dolazi hladnije rashladno sredstvo te se proces ponavlja. Faza vrenja prikazana je na slici 4.2.



*Slika 4.2. Gašenje - Faza vrenja [5]*

Posljednja faza procesa gašenja je faza konvekcije. Ova se faza ostvaruje nakon što temperatura rashladnog medija padne ispod njegove temperature vrenja. Prijenos topline u ovoj se fazi odvija konvekcijom, odnosno procesom gdje toplina prelazi sa stijenke ugrijanog predmeta na rashladni medij. Faza konvekcije prikazana je na slici 4.3.



*Slika 4.3. Gašenje - Faza konvekcije [5]*

Usljed uranjanja tijela visoke temperature u rashladni medij, dolazi do fizikalnih promjena specifičnih za proces gašenja. Proces prijelaza topline uzorkuje zagrijavanje medija koji se nalazi neposredno uz vruću stijenku uronjenog tijela. Budući da je za proces kaljenja specifično zagrijavanje čelika iznad 800°C, temperatura rashladnog medija u inicijalnim trenucima prelazi temperaturu vrenja. Faza parnog omotača i faza vrenja upućuju na visoke poraste temperature rashladnog medija. Usljed naglog porasta temperature odvijaju se burni fizikalni i kemijski procesi gdje medij vrije i ostvaruje spontano strujanje. Koeficijent prijelaza topline ovisi o temperaturi medija te njegovom stanju strujanja. Kod kaljenja, priroda postupka uzrokuje nestacionarno stanje rashladnog medija što se očituje u nestacionarnim vrijednostima koeficijenta prijelaza topline.

#### 4.2. Parametri odvođenja topline

Režim odvođenja topline ključan je kod postizanja željenih konačnih svojstva izratka. Važno je raspoznavati utjecajne parametre kojima je definiran proces odvođenja topline budući da se upravo njima definira numerički model za simulaciju hlađenja uzorka kod kaljenja. Gašenje podrazumijeva uranjanje metalnog uzorka zagrijanog na visoku temperaturu u rashladni medij značajno niže temperature. U tom se slučaju javlja nestacionarno temperaturno polje u izotropnom krutom tijelu bez dodatnih izvora topline, što se može opisati Fourierovim zakonom provođenja topline: [6]

$$\frac{\delta(c\rho T)}{\delta t} = \text{div}(\lambda \text{grad}T) \quad (4.1)$$

Gdje su ključni parametri kojima je definirano odvođenje topline:

$c$  – specifični toplinski kapacitet [J/kgK]

$\rho$  – gustoća materijala [kg/m<sup>3</sup>]

$\lambda$  - koeficijent provođenja topline [W/mK]

Kod procesa gašenja osim provođenja topline (kondukcije) kao rubni uvjet javlja se prijelaz topline (konvekcija), što se može opisati jednačbom: [6]

$$-\lambda \left. \frac{\delta T}{\delta n} \right|_s = \alpha (T_s - T_f) \quad (4.2)$$

Gdje su ključni parametri kojima je definiran proces konvekcije:

$\alpha$  - koeficijent prijelaza topline [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]

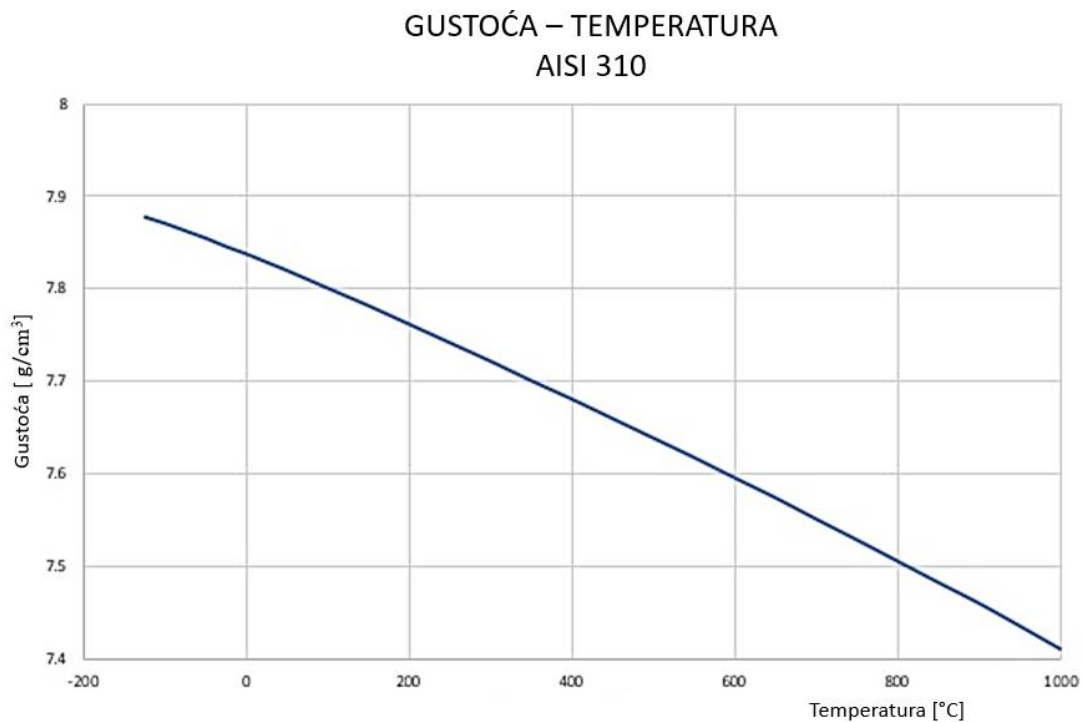
$T_s$  – temperatura na površini stijenke uzorka [K]

$T_f$  – temperatura rashladnog medija [K]

Nakon što su definirani ključni parametri kojima je opisan režim odvođenja topline, promatra se svaki od njih posebno kako bi se steklo bolje razumijevanje njihovog utjecaja na proces odvođenja topline.

## 4.2.1. Gustoća materijala uzorka

Gustoća materijala ( $\rho$ ) je fizikalno svojstvo koje je definirano kao omjer mase i volumena. Gustoća se mijenja u ovisnosti o temperaturi, primjer za čelik AISI 310 je prikazan na slici 4.4.

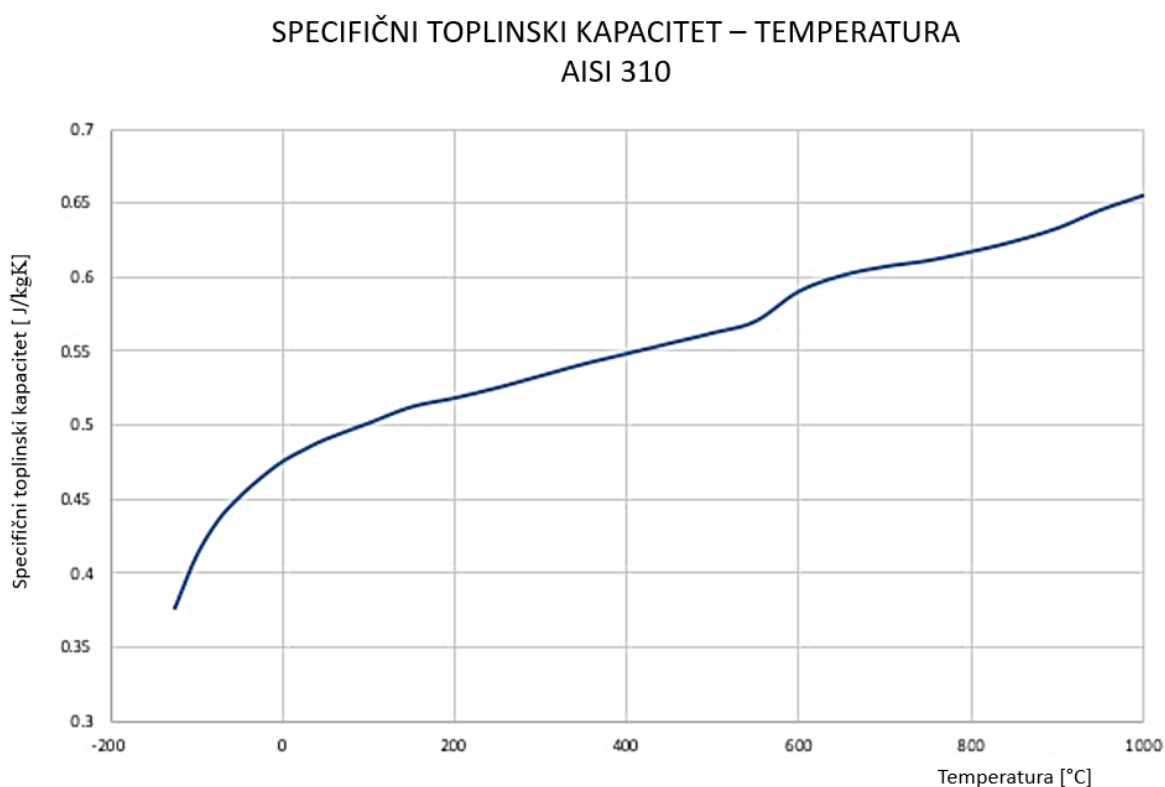


Slika 4.4. Ovisnost gustoće čelika AISI 310 o temperaturi [7]

Vidljivo je da su kod čelika AISI 310 za velike temperaturne razlike prisutne promjene gustoće, međutim promjene nisu značajne te se kod određenih situacija mogu zanemariti. Unutar rada utvrđeno je da za raspon temperatura za koji se rad provodi promjena gustoće ne utječe značajno na rezultate zbog čega se ovisnost gustoće o temperaturi zanemaruje.

#### 4.2.2. Specifični toplinski kapacitet

Specifični toplinski kapacitet ( $c$ ) je količina topline koju treba dovesti jediničnoj količini tvari kako bi joj se temperatura povisila za  $1^{\circ}\text{C}$ . Ovom se veličinom definira sposobnost promjene temperature čelika uslijed dovođenja topline. Specifični toplinski kapacitet također se mijenja u ovisnosti o temperaturi, a primjer za čelik AISI 310 je dan na slici 4.5.



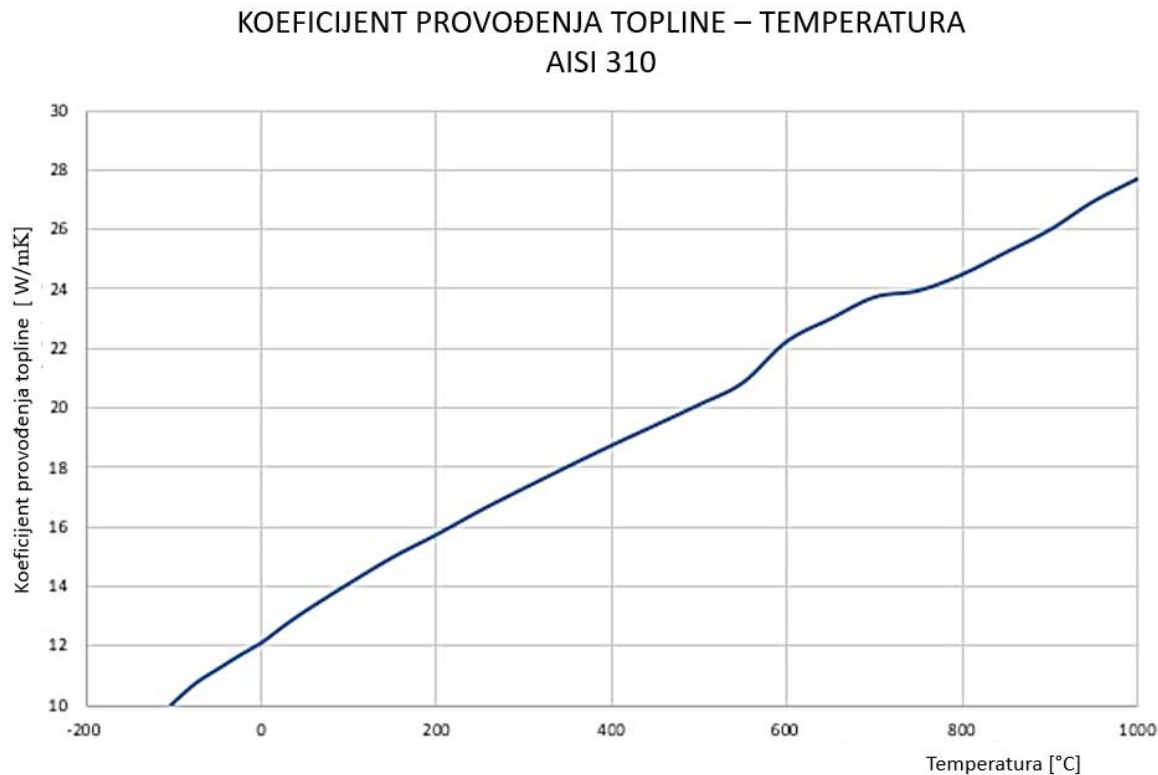
Slika 4.5. Ovisnost specifičnog toplinskog kapaciteta čelika AISI 310 o temperaturi [7]

Vidljivo je da su kod čelika AISI 310 za velike temperaturne razlike prisutne promjene specifičnog toplinskog kapaciteta, međutim promjene nisu značajne te se za određene situacije mogu zanemariti. Utvrđeno je da za raspon temperatura za koji se ovaj rad provodi promjena specifičnog toplinskog kapaciteta ne utječe značajno na rezultate zbog čega se ovisnost o temperaturi zanemaruje.

#### 4.2.3. Koeficijent provođenja topline

Provođenje topline ili kondukcija, vrsta je prijelaza topline koji se odvija kroz krutu stijenku, što je u slučaju kaljenja kroz metalni uzorak. Ovaj se oblik prijelaza topline odnosi samo na izmjenu topline unutar metalnog uzorka, neovisno o fluidu koji ga okružuje. Toplina se izmjenjuje iz područja više u područje niže temperature, što za slučaj gašenja znači iz jezgre uzorka prema njegovoj stijenci.

Proces provođenja topline definiran je razlikom temperatura sa koje se uzorak ohlađuje i koeficijentom provođenja topline. Koeficijent provođenja topline ( $\lambda$ ) opisuje sposobnost toplinske vodljivosti čelika. Vrijednost koeficijenta  $\lambda$  ovisi o temperaturi, što znači da se toplinska vodljivost pojedinog čelika, uslijed faznih promjena koje se događaju u mikrostrukturi prilikom gašenja, mijenja u ovisnosti o temperaturi. Za primjer, prikaz koeficijenta provođenja topline u ovisnosti o temperaturi za čelik AISI 310 dan je na slici 4.6.



Slika 4.6. Ovisnost koeficijenta provođenja topline čelika AISI 310 o temperaturi [7]

Vidljivo je da za materijal AISI 310 koeficijent provođenja topline  $\lambda$  pri 20°C iznosi približno 12 W/mK dok je za isti materijal na 800°C koeficijent provođenja topline 24,5 W/mK. Budući da je to raspon temperatura na kojem se odvija proces gašenja, a vidljivo je da je vrijednost koeficijenta provođenja topline dvostruko veća u početnoj fazi (na 800°C) nego na kraju procesa gašenja (na 20°C) važno je uzeti u obzir utjecaj temperaturne ovisnosti faktora koeficijenta provođenja topline. Zbog kompleksnosti se u sklopu diplomskog rada temperaturna ovisnost koeficijenta provođenja topline zanemaruje, međutim uvažava se da su zbog te pretpostavke moguća određena odstupanja.

#### 4.2.4. Koeficijent prijelaza topline

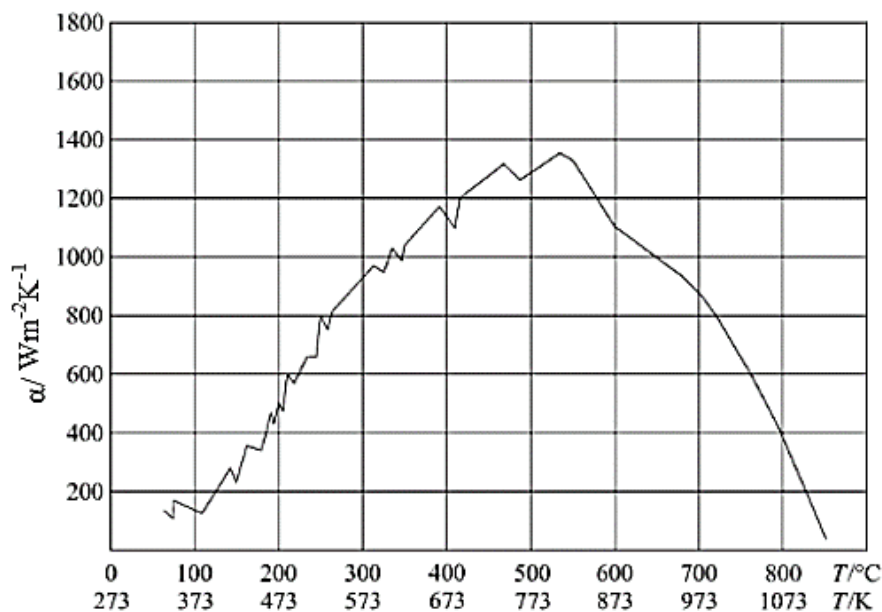
Prijelaz topline ili konvekcija je proces izmjene topline između krute stijenke i fluida. Za slučaj gašenja, time se podrazumijeva proces izmjene topline stijenke metalnog uzorka i rashladnog medija u koji se uzorak uranja. Proces konvekcije definiran je dimenzijama metalnog uzorka budući da se prijelaz topline odvija duž stijenke uzorka. Za konvekciju je potrebna razlika temperatura zbog čega je također definirana razlikom temperature medija u koji se uzorak uranja i temperature stijenke uzorka. Vrlo važan i kompleksan parametar kojim se opisuje proces konvekcije je koeficijent prijelaza topline.

Koeficijent prijelaza topline ( $\alpha$ ) opisuje ponašanje rashladnog medija te ovisi o njegovim fizikalnim svojstvima i o načinu strujanja. Utvrđeno je da je gašenje proces gdje se ostvaruje nestacionarno stanje uslijed porasta temperature i vrenja rashladnog medija te simultanog ostvarenja spontanog strujanja medija. Ovisno o režimu gašenja, strujanje se može dodatno potaknuti miješanjem. Sukladno, vrijednost koeficijenta prijelaza topline nije stacionarna, već se uslijed temperaturnih porasta i promjena kod strujanja medija ostvaruje nestacionarnost koeficijenta prijelaza topline. Dakle, nestacionarnost procesa gašenja i smirivanje inicijalno burnih reakcija kod uranjanja uzorka u rashladno sredstvo se kod numeričkog modela opisuje koeficijentom prijelaza topline.

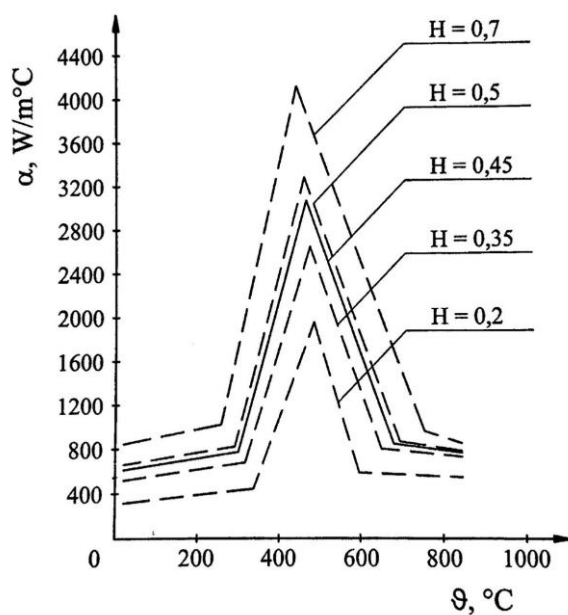
Raspodjela vrijednosti koeficijenta prijelaza topline u ovisnosti o temperaturi teško se određuje budući da je istovremeno definirana dimenzijama uzorka ( površinom odvođenja topline ) te



režimom hlađenja, odnosno strujanjem i promjenama temperature rashladnog sredstva. Sukladno, ne postoje propisane vrijednosti koeficijenta prijelaza topline jer su one jedinstvene za svaki slučaj gašenja. Na slici 4.7. prikazana je raspodjela koeficijenta prijelaza topline za gašenje čelika AISI 4140 (42 Cr Mo 4) u ulju bez miješanja dok je na slici 4.8. raspodjela koeficijenta prijelaza topline za isti slučaj ali sa miješanjem.



Slika 4.7. Raspodjela koeficijenta prijelaza topline za gašenje bez miješanja [6]



Slika 4.8. Raspodjela koeficijenta prijelaza topline za gašenje sa miješanjem [6]

Usporedbom slike 4.7. i slike 4.8. vidljivo je kako se za isti medij gašenja, a drugačiji režim hlađenja ostvaruju različite raspodjele i vrijednosti koeficijenta prijelaza topline u ovisnosti o temperaturi. Obzirom da se koeficijent prijelaza topline teško određuje i ne može se izravno mjeriti, potrebno ga je određivati uz primjenu iterativnih kalibracija za točno promatrani slučaj gašenja.

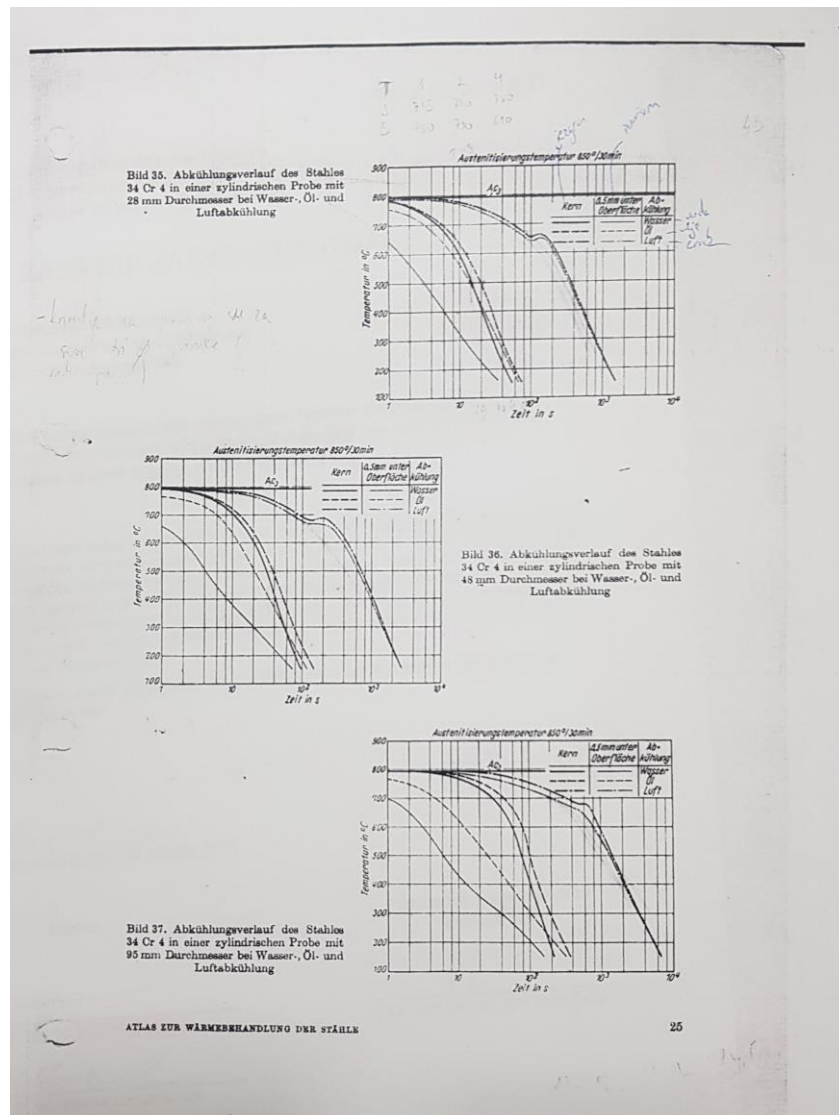
U sklopu diplomskog rada raspodjela koeficijenta prijelaza topline nije poznata, kao niti točan režim gašenja. Zbog toga se koriste referentne, eksperimentalno određene krivulje ohlađivanja koje opisuju na koji su se način mijenjala temperatura u određenim dijelovima uzorka ovisno o vremenu. Eksperimentalne krivulje ohlađivanja služe kao referenca za umjeravanje te se koriste kod iterativne kalibracije nepoznatog parametra, koji je u ovom slučaju raspodjela koeficijenta prijelaza topline.

## 5. RAZVOJ NUMERIČKOG MODELA

U sklopu diplomskog rada razvija se numerički model za procjenu tvrdoće čeličnog uzorka nakon kaljenja temeljen na metodi konačnih elemenata. Provodi se nestacionarna toplinska analiza u šire dostupnom programskom paketu ANSYS *Mechanical*. Glavne funkcije ovog programa su strukturna analiza koja podrazumijeva linearnu dinamiku, nelinearne analize, strukturnu optimizaciju. Osim strukturne analize, u sklopu paketa sadržan je modul za toplinsku analizu te je moguće simulirati jednostavne toplinske procese poput kondukcije, konvekcije i radijacije. Iako ANSYS *Mechanical* nije program specijaliziran za numeričku analizu industrijskih toplinskih procesa, zbog sadržanih modula za simulaciju jednostavnih toplinskih procesa u sklopu rada koristi se za razvoj numeričkog modela za simulaciju ohlađivanja kod kaljenja.

U sklopu rada razvija se APDL kod kojim se definira numerički model za simulaciju ohlađivanja čeličnog uzorka u ulju kod procesa kaljenja. APDL kod razvija se na način da je parametarski definiran te prilagođen čelicima za poboljšavanje. Zbog parametarski definiranog modela numerička se analiza može provesti za različite geometrije uzoraka i različite čelike za poboljšavanje. Gašenje se simulira korištenjem nestacionarne toplinske analize. Numerički model koji se izrađuje služi za generiranje krivulja ohlađivanja pojedinih točaka u uzorku. Krivulje ohlađivanja dobivene numerički u daljnjim se koracima koriste za analitičku procjenu tvrdoće.

Izazov kod razvoja numeričkog modela za simulaciju gašenja u ulju stvara nestacionarnost koeficijenta prijelaza topline. Budući da nisu poznate vrijednosti koeficijenta prijelaza topline, potrebno je provesti iterativnu kalibraciju istih. Koeficijent prijelaza topline kalibrira se koristeći referentne eksperimentalno određene krivulje ohlađivanja za promatrani čelik. Na slici 5.1. dan je isječak iz literature gdje su prikazane referentne krivulje ohlađivanja koje se koriste kod razvoja numeričkog modela. Ovo je samo pokazni primjer te su krivulje u daljnim koracima, zbog čitkosti, digitalizirane.



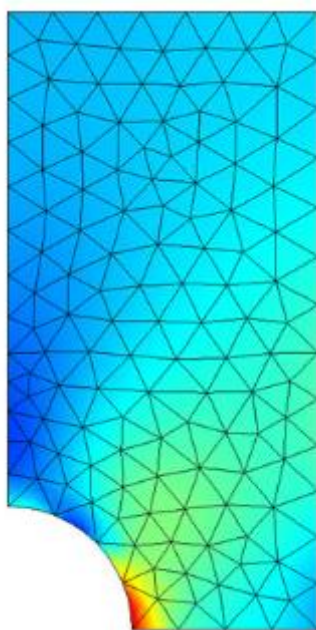
Slika 5.1. Isječak iz literature sa prikazom referentnih krivulja ohlađivanja [8]

Numerički model koji se razvija u sklopu rada validira se na način da se kalibriraju numerički dobivene krivulje hlađenja u odnosu na referentne eksperimentalno određene krivulje hlađenja.

## 5.1. Teorijske osnove metode konačnih elemenata

Za razvoj numeričkog modela potrebno je poznavati teorijske osnove metode konačnih elemenata. Metoda konačnih elemenata je metoda za rješavanje problema sa definiranim rubnim uvjetima, temeljena na fizičkom rastavljanju konstrukcije na odgovarajući broj konačnih elemenata. Primjenjuje se kada je izvođenje analitičkog proračuna nemoguće ili previše složeno. Metodom konačnih elemenata se ubrzava proces izrade prototipa i ispitivanja do zadovoljavajućeg rješenja.

Konačni elementi mogu biti linijski, plošni ili trodimenzijski. Konačni su elementi međusobno povezani čvorovima, čime se ostvaruje mreža konačnih elemenata kao na primjeru na slici 5.2.



Slika 5.2. Primjer mreže konačnih elemenata [9]

Primjenom odgovarajućih jednadžbi mehanike kontinuuma dovode se u vezu pomaci i/ili opterećenja (mehanička ili toplinska) u polju definiranom mrežom konačnih elemenata, s pomacima i/ili opterećenjima u čvorovima konačnog elementa. Na taj se način dolazi do osnovne jednadžbe konačnog elementa, a združivanjem osnovnih jednadžbi pojedinih konačnih elemenata dobiva se jednadžba konstrukcije kojom je opisano ponašanje konstrukcije.

Kod razvoja numeričkog modela metodom konačnih elemenata potrebno je poznavati određene ulazne vrijednosti te ključne pretpostavke pomoću kojih se model definira. Za razvoj numeričkog modela za simulaciju procesa gašenja potrebno je definirati sljedeće stavke:

- Vrstu numeričke analize
- Vrstu konačnog elementa
- Geometriju uzorka (dimenzije)
- Svojstva materijala uzorka ( $\lambda, c, \rho$ )
- Mrežu (veličinu) konačnih elemenata
- Rubne uvjete i opterećenja

## 5.2. Definiranje numeričkog modela

Razvija se 2D numerički model za simulaciju ohlađivanja kod postupka kaljenja u programskom paketu ANSYS *Mechanical*. Izrađuje se parametarski definiran APDL kod s ciljem da se uz korištenje jednog koda numerička analiza može prilagoditi različitim geometrijama uzoraka i različitim čelicima za poboljšavanje. Numerički model razvija se sa ciljem generiranja krivulja ohlađivanja koje se naknadno koriste za analitičko određivanje tvrdoće pojedinog dijela uzorka.

### 5.2.1. Definiranje vrste numeričke analize

Proces gašenja podrazumijeva uranjanje vrućeg metalnog uzorka u rashladni medij te odvođenje topline u određenom vremenskom periodu. Kada se nastoji numerički modelirati, odvođenje topline kod procesa gašenja opisuje se kao provođenje i konvekcija zbog čega se u programskom paketu ANSYS *Mechanical* koristi modul za provedbu nestacionarne toplinske analize.

Trodimenzijski problem ohlađivanja metalnog uzorka aproksimira se dvodimenzijskim numeričkim modelom čime se svodi na ravninski problem. Koriste se plošni (2D) konačni elementi.

### 5.2.2. Definiranje geometrije prema referentnim uzorcima

Kod procesa gašenja odvođenje topline prostorni je problem. U sklopu diplomskog rada se cilindrična geometrija ispitnih uzoraka aproksimira dvodimenzijским numeričkim modelom čime se gašenje svodi na ravninski problem.

Postupak izrade numeričkog modela potrebno je u svakom koraku validirati. Zbog toga se numerički model razvija na način da opisuje problem za koji postoje eksperimentalno određene vrijednosti. Na taj se način tokom razvoja numerički model uspoređuje i validira na temelju eksperimentalno izmjerenih referentnih vrijednosti. U tablici 5.1. dane su informacije o referentnim uzorcima koji se koriste u radu za validaciju numeričkog modela.

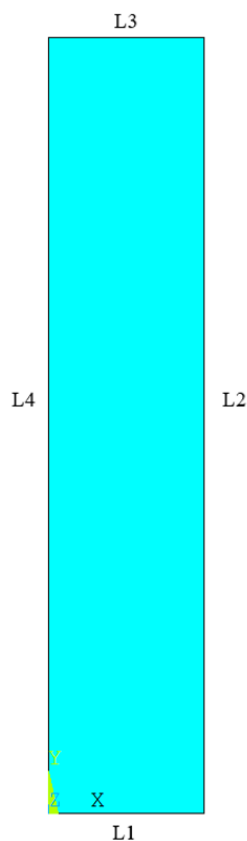
Tablica 5.1. Informacije o referentnim uzorcima

<b>BROJ UZORKA</b>	<b>PROMJER [mm]</b>	<b>DULJINA [mm]</b>	<b>MATERIJAL</b>	<b>REFERENCA</b>
<i>UZORAK 1</i>	Ø28	140	34 Cr 4	[8]
<i>UZORAK 2</i>	Ø48	225	34 Cr 4	[8]
<i>UZORAK 3</i>	Ø95	475	34 Cr 4	[8]
<i>UZORAK 4</i>	Ø90	200	42 Cr Mo 4	[6]

Uzorak 1, 2, 3 odnose se na eksperimentalno dobivene krivulje hlađenja za legirani čelik 34 Cr 4 prema „Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle“ [8]. Ove se krivulje, ovisno o promjeru uzorka, koriste za utvrđivanje točnosti dobivene krivulje ohlađivanja numeričkog modela koji se radi u sklopu diplomskog rada.

Uzorak 4 odnosi se na eksperimentalno dobivene rezultate mjerenja tvrdoće za uzorak iz legiranog čelika 42 Cr Mo 4 prema članku „Mathematical Modeling and Simulation of Hardness of Quenched and Tempered Steel“ [6]. Podaci o uzorku 4 koriste se kod validiranja vrijednosti tvrdoće koje se dobiju za izrađeni numerički model.

Na slici 5.3. prikaz je definirane geometrije numeričkog modela. Za potrebe rada geometrija cilindričnog ispitnog uzorka aproksimirana je 2D numeričkim modelom čije dimenzije odgovaraju dimenzijama poprečnog presjeka ispitnog uzorka. Gašenje je time svedeno na ravninski problem te se za definiranje modela koriste se plošni (2D) konačni elementi.



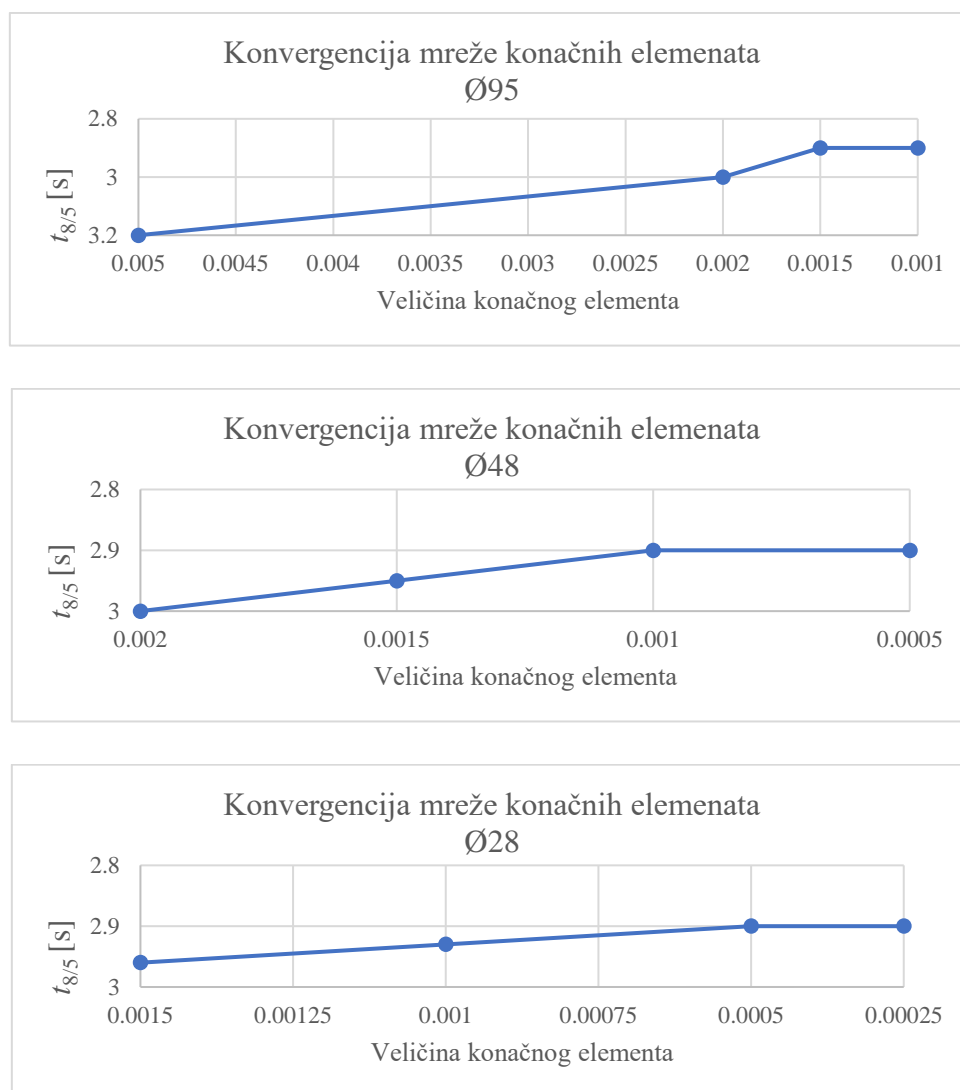
Slika 5.3. Primjer izrađenog numeričkog modela dimenzija 95x475

Numerički model sveden je na ravninsku aproksimaciju te je definiran je kao pravokutnik određen linijama L1, L2, L3 i L4. Definirane dimenzije modela odgovaraju dimenzijama poprečnog presjeka uzorka za koji se promatra slučaj gašenja što znači da duljina linije L1 i L3 odgovara promjeru ispitne epruvete, dok duljina L2 i L4 odgovara duljini ispitne epruvete. Linijama su određeni vanjski gabariti uzorka te se definiraju konačni elementi unutar definiranih granica. Veličina konačnih elemenata određuje se definiranjem gustoće mreže koja se prilagođava ovisno o dimenzijama modela koji se promatra. U sklopu diplomskog rada promatraju se dimenzije uzorka prema tablici 5.1.



## 5.2.3. Definiranje mreže konačnih elemenata

Definiran je aproksimirani 2D numerički model za izradu kojeg se koriste ravninski konačni elementi. Za dimenzije numeričkog modela koji se razvija u sklopu rada potrebno je odrediti adekvatnu mrežu konačnih elemenata. Gustoća mreže definirana je veličinom pojedinog konačnog elementa. Budući da se u sklopu rada promatraju dimenzije uzoraka različitih veličina potrebno je provesti analizu konvergencije mreže konačnih elemenata za sve veličine uzoraka kako bi se osigurala mjerodavnost rezultata numeričke analize. Promatra se konvergencija mreže različitih gustoća za isto područje na uzorcima različitih dimenzija. Na slici 5.4. prikazana je konvergencija mreže za numeričke modele dimenzija  $\varnothing 95$ ,  $\varnothing 48$  i  $\varnothing 28$ .

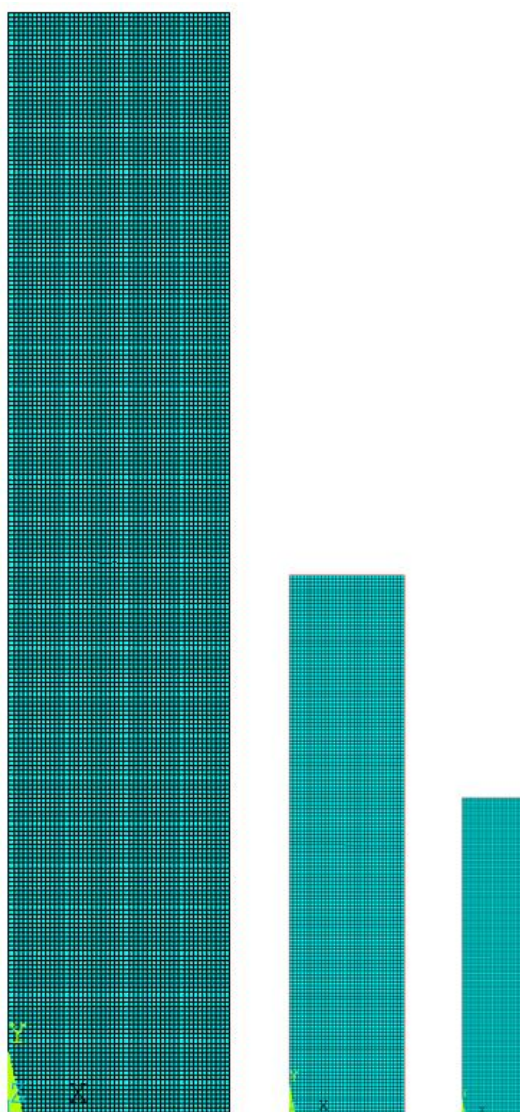


Slika 5.4. Konvergencija mreže za numeričke modele različitih dimenzija

Za sve je slučajeve postignuta zadovoljavajuća stopa konvergencije mreže niža od 5%. Za razvoj numeričkih modela koji se obrađuju u sklopu rada usvajaju se sljedeće veličine konačnih elemenata:

- Uzorak  $\text{Ø}95 \times 475$  – veličina elementa 0,002
- Uzorak  $\text{Ø}48 \times 225$  – veličina elementa 0,0015
- Uzorak  $\text{Ø}28 \times 140$  – veličina elementa 0,001

Na slici 5.5. dan je prikaz omreženih numeričkih modela za različite dimenzije ( $\text{Ø}95$ ,  $\text{Ø}48$  i  $\text{Ø}28$ ).



Slika 5.5. Prikaz omreženih numeričkih modela

#### 5.2.4. Definiranje svojstava materijala

Određena je vrsta numeričke analize i geometrija numeričkog modela te je u sljedećem koraku potrebno definirati svojstva materijala budući da je njima određeno ponašanje pri toplinskim opterećenjima. Svojstva materijala kojima se u ANSYS-u opisuje ponašanje dodijeljenog materijala su:

- Koeficijent provođenja topline
- Gustoća materijala
- Specifični toplinski kapacitet

Materijali ispitnih uzoraka koji se promatraju u sklopu rada su čelici za poboljšavanje navedeni u tablici 5.2. sa pripadajućim svojstvima.

*Tablica 5.2. Svojstva promatranih čelika [10]*

<b>MATERIJAL</b>	<b>KOEFICIJENT PROVOĐENJA TOPLINE <math>\lambda</math> [W/mK]</b>	<b>GUSTOĆA <math>\rho</math>[kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>SPECIFIČNI TOPLINSKI KAPACITET <math>c</math> [J/kgK]</b>
<b>34 Cr 4</b>	47	7870	561
<b>42 Cr Mo 4</b>	46	7850	460

Budući da se u sklopu rada razmatraju isključivo čelici za poboljšavanje, vidljivo je da se svojstva ne razlikuju značajno.

### 5.2.5. Definiranje opterećenja i rubnih uvjeta

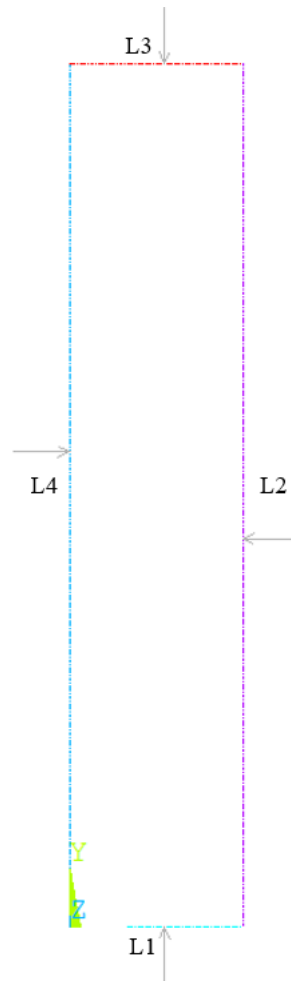
Numeričkom modelu za simulaciju hlađenja pri kaljenju potrebno je definirati djelovanje toplinskih opterećenja i rubne uvjete. Kada se slučaj uranjanja vrućeg metalnog uzorka u rashladni medij nastoji opisati u svrhu izrade numeričkog modela definiraju se sljedeći procesi kojima je opisano ohlađivanje:

- Provođenje topline (ponašanje definirano materijalom)
- Početni rubni uvjet (stanje inicijalnog trenutka)
- Prijelaz topline (djelovanje toplinskih opterećenja)

Kod razvoja numeričkog modela u programskom paketu ANSYS provođenje topline definirano je svojstvima materijala, koja su dana u tablici 5.2.

Kao rubni uvjet postavlja se raspodjela temperatura duž uzorka u inicijalnom trenutku kod početka gašenja. Raspodjela temperatura u početnom se trenutku pretpostavlja jednolikom duž presjeka. Temperatura uzorka u inicijalnim trenucima gašenja definira se prema referentnim krivuljama ohlađivanja te se kao početni rubni uvjet pretpostavlja jednolika raspodjela temperatura duž uzorka koja iznosi 800°C. [8]

Kao slučaj toplinskog opterećenja definira se konvekcija. Konvekcija se odnosi na izmjenu topline između stijenke čeličnog uzorka i rashladnog medija. Pretpostavlja se da se čelični uzorak u cijelosti uranja u rashladni fluid, što znači da se konvekcija u numeričkom modelu definira po cijelom obodu. Područje na kojem se odvija konvekcija definira se na svim rubnim linijama ( L1, L2, L3, L4) što je prikazano na slici 5.6.



Slika 5.6. Prikaz definiranog odvođenja topline na rubnim linijama

Prijelaz topline ili konvekcija ovisi o rashladnom mediju i režimu hlađenja. Utvrđeno je da je proces gašenja nestacionaran te su promjene temperatura i inicijacija strujanja rashladnog medija kod numeričkog modela opisane koeficijentom prijelaza topline. Za slučajeve gašenja koji se obrađuju u sklopu diplomskog rada raspodjela koeficijenta prijelaza topline nije poznata, kao niti točan režim gašenja.

U sklopu diplomskog rada provode se dvije vrste numeričke analize. Iako je poznato da koeficijent prijelaza topline nije stacionaran, preliminarno se izrađuje i numerički model sa definiranim stacionarnim koeficijentom prijelaza topline kako bi se provela usporedba sa numeričkim modelom sa definiranim varijabilnim koeficijentom prijelaza topline. Dakle numerički model izrađuje se na dva načina:

- Preliminarni model sa stacionarnim koeficijentom prijelaza topline
- Kompleksni model sa varijabilnim (nestacionarnim) koeficijentom prijelaza topline

Preliminarni se model definira uz korištenje prosječne vrijednosti koeficijenta prijelaza topline za određeni režim hlađenja. Sredstvo gašenja koje se promatra u sklopu rada je ulje. Za ulje u slobodnoj konvekciji raspon vrijednosti koeficijenta prijelaza topline kreće se od  $\lambda = 50 \text{ W/m}^2\text{K}$  dok je za prisilnu konvekciju poznato da vrijednosti mogu dostići i vrijednosti do  $4000 \text{ W/m}^2\text{K}$  (slika 4.8.). [6]

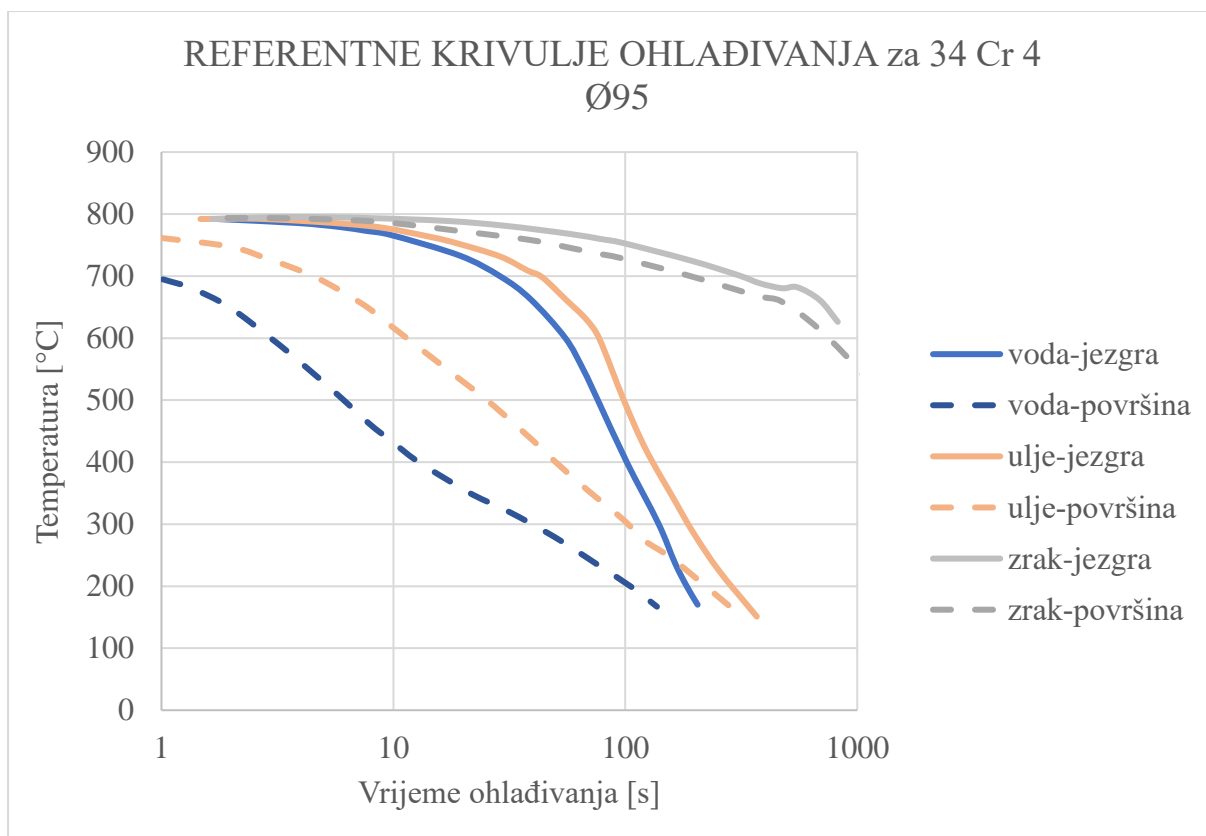
Kod razvoja numeričkog modela sa varijabilnim koeficijentom prijelaza topline, javlja se kompleksnija situacija budući da nije poznata raspodjela koeficijenta prijelaza topline, kao niti precizan režim gašenja. Zbog toga se izradi ovog numeričkog modela pristupa postupkom iterativne kalibracije koeficijenta prijelaza topline uz korištenje referentnih krivulja ohlađivanja.

## 6. REFERENTNE KRIVULJE OHLAĐIVANJA

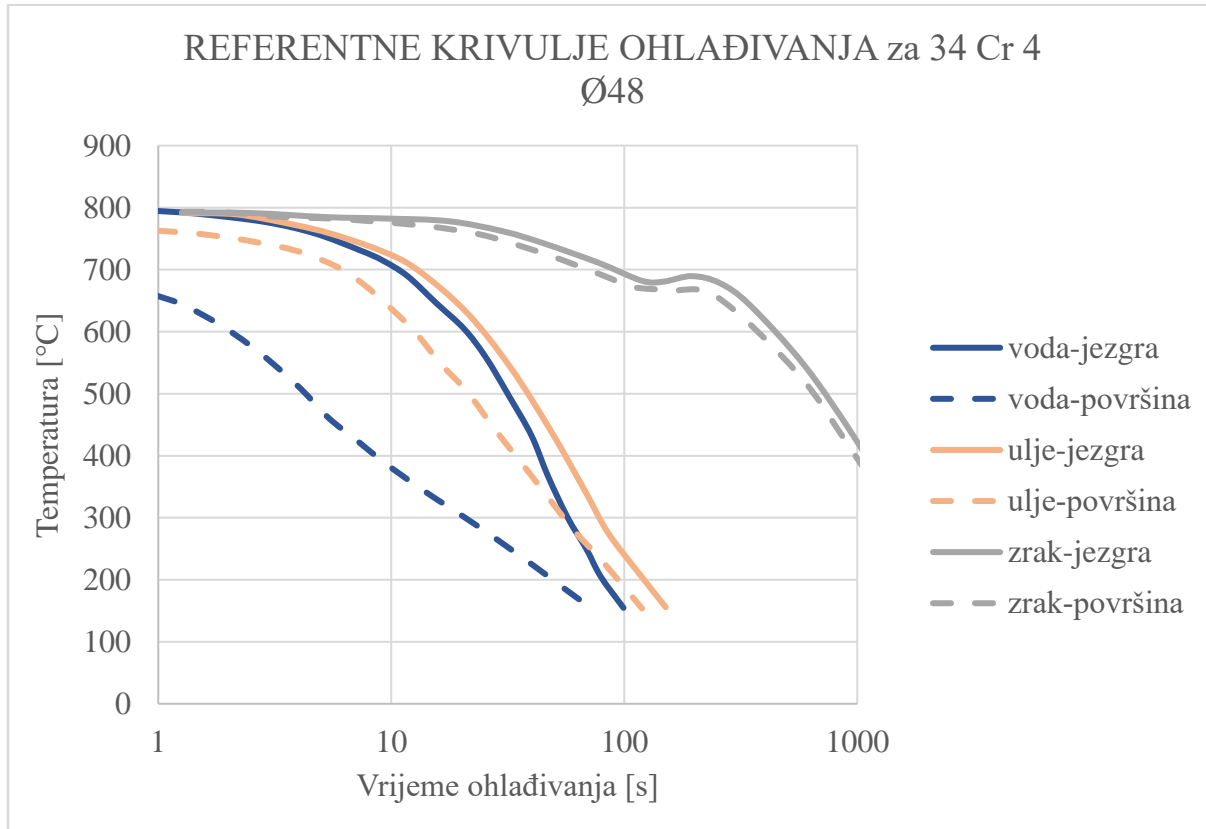
Rezultat toplinske numeričke analize koja se provodi u sklopu rada je raspodjela temperatura određenih točaka uzorka nakon određenog vremena. Krivulja koja prikazuje raspodjelu temperatura ovisno o vremenu naziva se krivuljom ohlađivanja. Njome je grafički definiran trend hlađenja određene točke unutar uzorka, a u sklopu rada promatra se hlađenje jezgre i površine uzorka. Krivulje ohlađivanja važne su jer osim što prikazuju brzinu i način hlađenja, njima je definirano i vidljivo vrijeme hlađenja od 800°C do 500°C, koje se označava  $t_{8/5}$ . Vrijednost  $t_{8/5}$  podatak je na temelju kojega se daljnjim analitičkim postupcima određuje tvrdoća promatranog čvora uzorka.

U sklopu rada potrebno je imati referentne podatke kako bi se u svakom koraku razvoja validirala točnost numeričkog modela. Budući da pri izradi numeričkog modela za simulaciju gašenja nije poznat režim gašenja, odnosno raspodjela koeficijenta prijelaza topline, referentne krivulje ohlađivanja koriste se za iterativnu kalibraciju nepoznatih vrijednosti koeficijenta prijelaza topline.

Referentne krivulje koje se koriste su iz „Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle“ te su dobivene eksperimentalno za slučajeve gašenja metalnog uzorka iz čelika 34 Cr 4 za uzorke promjera Ø95, Ø48 i Ø28. Za navedene dimenzije uzoraka eksperimentalno su određene krivulje hlađenja površine i jezgre uzorka pri hlađenju u vodi, ulju i na zraku. Iako su referentnim krivuljama obuhvaćena sva sredstva hlađenja, u sklopu rada promatra se samo gašenje u ulju. Prikaz isječka iz literature gdje su ispisane referentne krivulje ohlađivanja dan je na slici 5.1. a digitalizirana verzija referentnih krivulja ohlađivanja prikazana je na slici 6.1., 6.2. i 6.3.

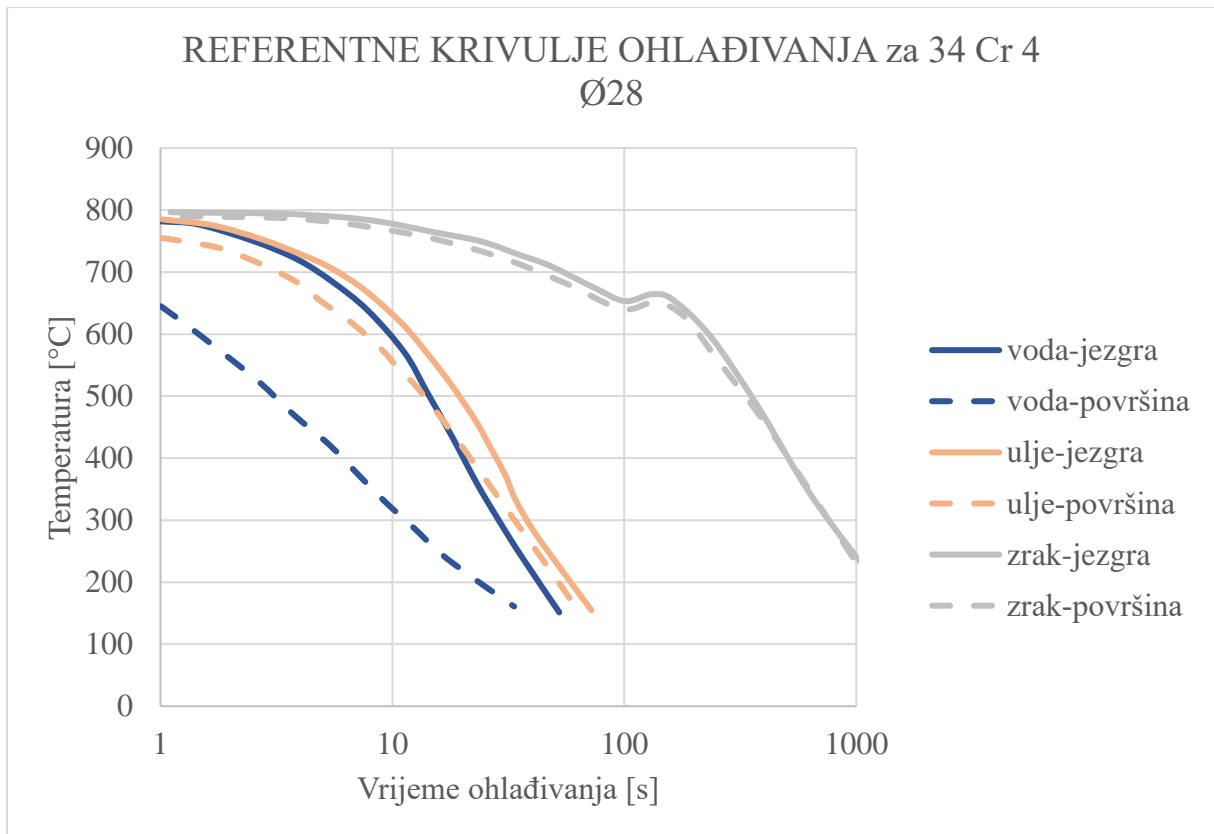


Slika 6.1. Referentne krivulje ohlađivanja - Ø95 – 34 Cr 4 [8]



Slika 6.2. Referentne krivulje ohlađivanja – Ø48 – 34 Cr 4 [8]





Slika 6.3. Referentne krivulje ohlađivanja – Ø28 – 34 Cr 4 [8]

## 7. KALIBRACIJA NUMERIČKOG MODELA SA STACIONARNIM KOEFICIJENTOM PRIJELAZA TOPLINE

Numerička analiza inicijalno se provodi sa aproksimiranim parametrima gašenja, što znači da se u ovoj fazi zanemaruje ovisnost koeficijenta  $\alpha$  i koeficijenta  $\lambda$  o temperaturi. Promatra se ukoliko je moguće ostvariti relevantne krivulje ohlađivanja uz korištenje poznatih standardnih i lako dostupnih vrijednosti koeficijenata  $\alpha$  i  $\lambda$  za promatrani čelik, odnosno sredstvo hlađenja.

Izrađuje se numerički model kojim se simulira slučaj kaljenja koji je opisan referentnim krivuljama iz „Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle“. U sklopu rada promatraju se referentne krivulje koje se odnose na kaljenje uzorka iz 34 Cr 4 gašenog u ulju. Za čelik 34 Cr 4 standardna su svojstva navedena u tablici 5.2. te ista vrijede za standardne uvjete kojima se podrazumijeva temperatura 20°C te se ne uzimaju u obzir promjene tih svojstava. Za procjenu tvrdoće nakon kaljenja relevantna je veličina  $t_{8/5}$  zbog čega se krivulje ohlađivanja ne promatraju u cijelosti već se promatra vrijeme ohlađivanja od 800°C do 500°C.

### 7.1. Prva iteracija – Dobivene krivulje ohlađivanja za stacionarni koeficijent $\alpha$

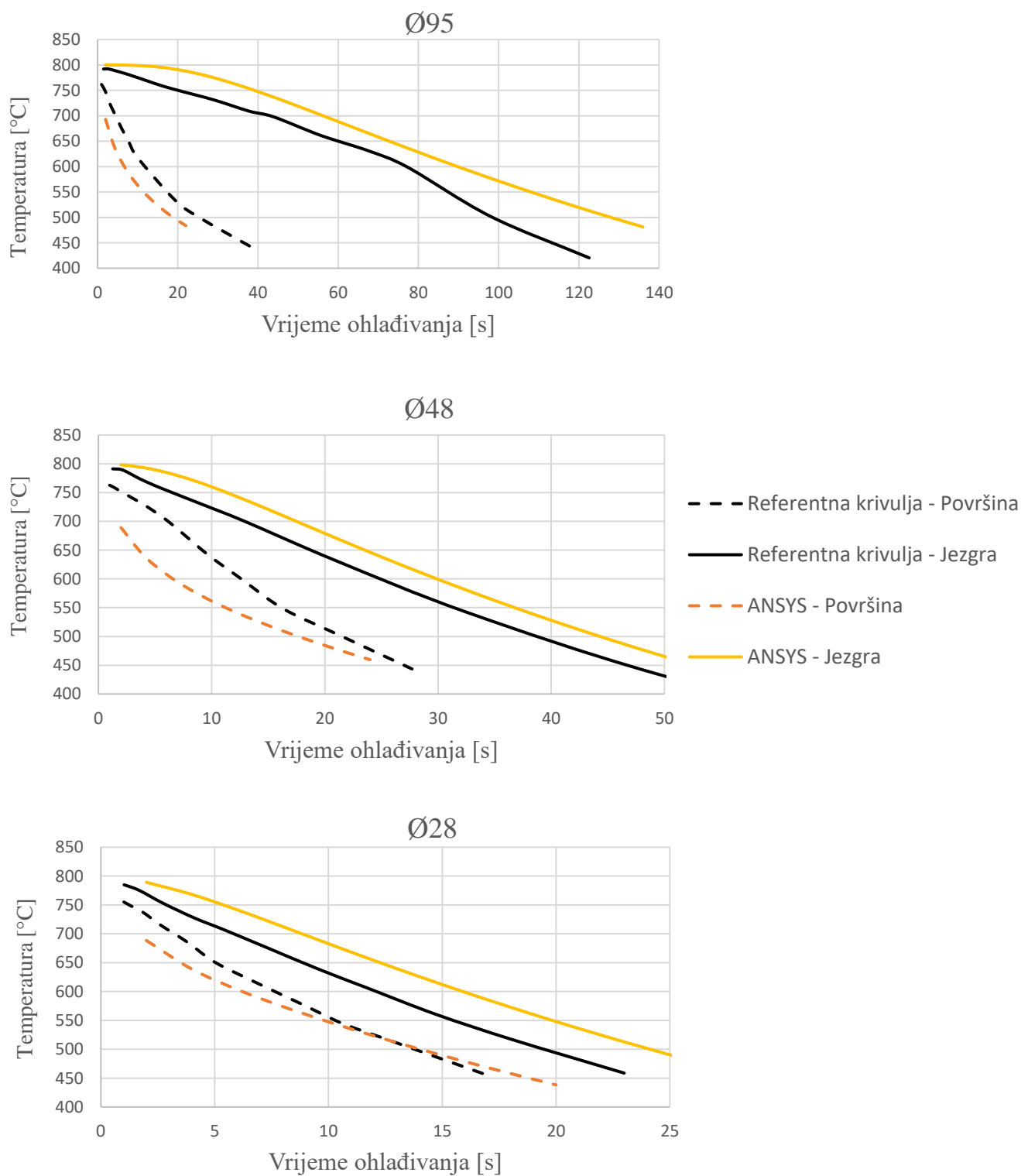
Dimenzije referentnih uzoraka čije se krivulje ohlađivanja koriste za validaciju su Ø95, Ø48 i Ø28. Za iste se dimenzije vrši numerička analiza. Poznato je da je referentni uzorak materijala 34 Cr 4 za kojeg su standardna svojstva navedena u tablici 5.2. Temperatura rashladnog ulja pretpostavlja se 20°C a inicijalna temperatura uzorka pretpostavlja se 800°C. Za ulje u prisilnoj konvekciji poznato da vrijednosti koeficijenta prijelaza topline mogu dostići i vrijednosti do 4000 W/m<sup>2</sup>K. [6] U prvoj se iteraciji pretpostavlja koeficijent prijelaza topline za prisilnu konvekciju:

$$\alpha = 1700 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Za definirane parametre na slici 7.1. prikazane su krivulje ohlađivanja koje se odnose na slučaj gašenja uzorka čelika 34 Cr 4 u ulju. Prikazane su krivulje ohlađivanja za uzorak promjera Ø95, Ø48 i Ø28. U sklopu rada prati se  $t_{8/5}$  te se na sljedećim se krivuljama hlađenja prati i kalibrira upravo područje ohlađivanja od 800°C do 500°C.

## KRIVULJE OHLAĐIVANJA za 34 Cr 4

$$\alpha = 1700 \text{ W/m}^2\text{K}$$



Slika 7.1. Prva iteracija – Krivulje ohlađivanja za stacionarni  $\alpha = 1700 \text{ W/m}^2\text{K}$

Kod krivulja ohlađivanja, za određivanje tvrdoće ključno je vrijeme potrebno da temperatura padne sa 800°C na 500°C. Vidljivo je da je za koeficijent prijelaza topline  $\alpha = 1700 \text{ W/m}^2\text{K}$  krivulja ohlađivanja za površinu vrlo dobro opisuje koliko je vremena bilo potrebno da temperatura padne na 500°C u odnosu na referentne vrijednosti. Krivulja ohlađivanje jezgre ima dobar oblik, međutim ostvaruje veća odstupanja ukoliko se promatra vrijeme potrebno da temperatura padne na 500°C. Budući da je za procjenu tvrdoće mjerodavna vrijednost  $t_{8/5}$  promatra se njeno odstupanje u odnosu na referentne krivulje što je prikazano u tablici 7.1.

Tablica 7.1. Prva iteracija – Odstupanja  $t_{8/5}$  za stacionarni  $\alpha = 1700 \text{ W/m}^2\text{K}$

	JEZGRA			POVRŠINA		
	Referentno vrijeme	ANSYS vrijeme	$\Delta t_{8/5}$	Referentno vrijeme	ANSYS vrijeme	$\Delta t_{8/5}$
	$t_{8/5}$ [s]	$t_{8/5}$ [s]		$t_{8/5}$ [s]	$t_{8/5}$ [s]	
<b>Ø95</b>	98	128	30	25	19	6
<b>Ø48</b>	39	44	5	21	17	4
<b>Ø28</b>	19	24	5	14	14	0

## 7.2. Druga iteracija – Dobivene krivulje ohlađivanja za stacionarni koeficijent $\alpha$

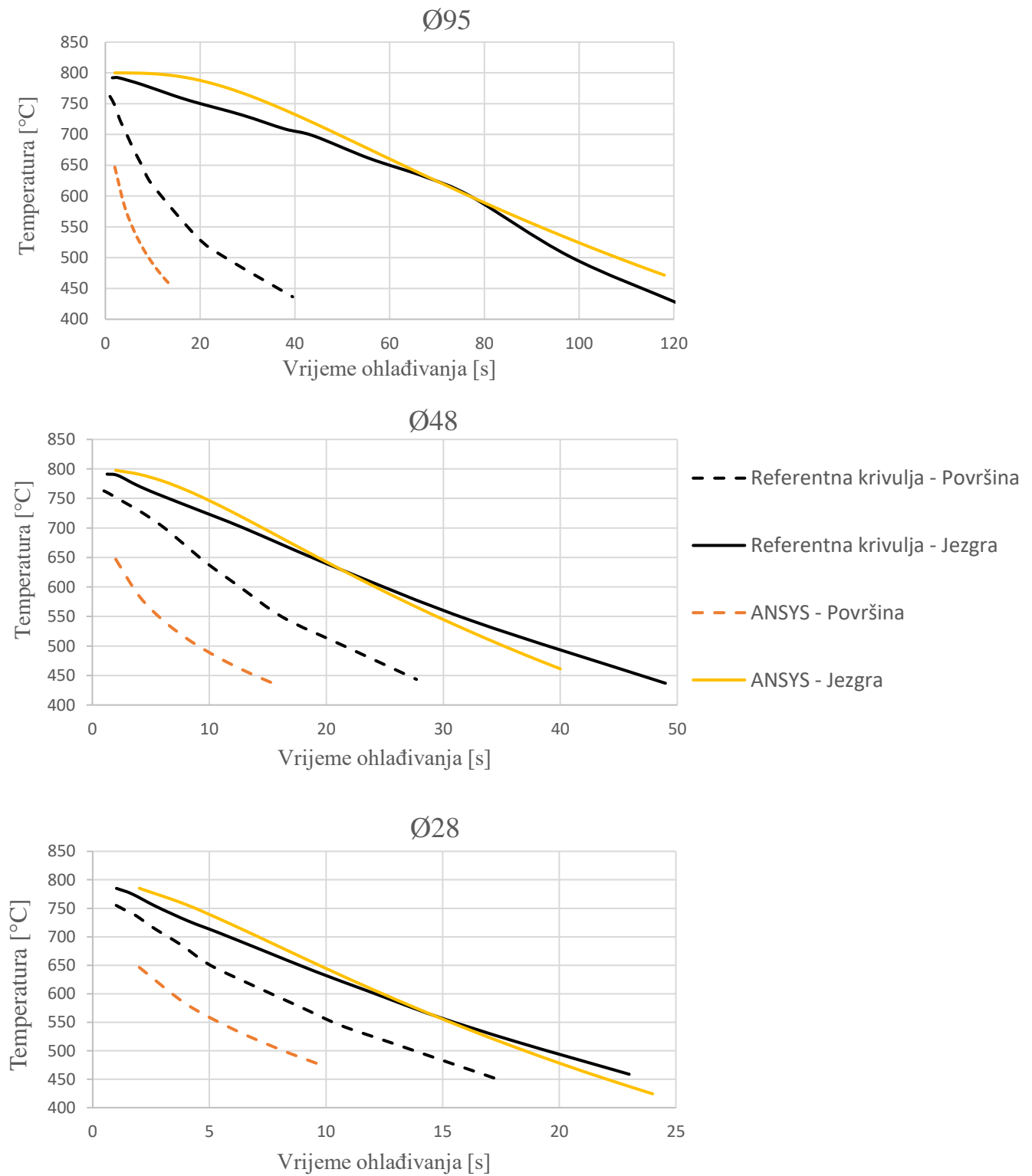
Vrši se druga iteracija sa ciljem bolje kalibracije krivulja ohlađivanja za stacionarni koeficijent prijelaza topline. Dimenzije referentnih uzoraka čije se krivulje ohlađivanja koriste za validaciju su Ø95, Ø48 i Ø28. Za iste se dimenzije vrši numerička analiza. Poznato je da je referentni uzorak materijala 34 Cr 4 za kojeg su standardna svojstva navedena u tablici 5.2. Temperatura rashladnog medija pretpostavlja se 20°C a inicijalna temperatura uzorka pretpostavlja se 800°C. Za ulje u prisilnoj konvekciji poznato da vrijednosti koeficijenta prijelaza topline mogu dostići i vrijednosti do 4000 W/m<sup>2</sup>K. [6] U drugoj se iteraciji koristi koeficijent prijelaza topline za prisilnu konvekciju:

$$\alpha = 2500 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Za definirane parametre na slici 7.2. prikazane su krivulje ohlađivanja za uzorak promjera Ø95, Ø48 i Ø28. Obzirom da je ključno  $t_{8/5}$  na sljedećim se krivuljama hlađenja prati i kalibrira upravo područje ohlađivanja od 800°C do 500°C.

## KRIVULJE OHLAĐIVANJA za 34 Cr 4

$$\alpha = 2500 \text{ W/m}^2\text{K}$$



Slika 7.2. Druga iteracija – Krivulje ohlađivanja za stacionarni  $\alpha = 2500 \text{ W/m}^2\text{K}$

Kod krivulja ohlađivanja, za određivanje tvrdoće ključno je vrijeme potrebno da temperatura padne sa 800°C na 500°C. Budući da je za procjenu tvrdoće mjerodavna vrijednost  $t_{8/5}$  promatra se njeno odstupanje u odnosu na referentne krivulje što je prikazano u tablici 7.2.

Tablica 7.2. Druga iteracija – Odstupanja  $t_{8/5}$  za stacionarni  $\alpha = 2500 \text{ W/m}^2\text{K}$

	JEZGRA			POVRŠINA		
	Referentno vrijeme $t_{8/5}$ [s]	ANSYS vrijeme $t_{8/5}$ [s]	$\Delta t_{8/5}$	Referentno vrijeme $t_{8/5}$ [s]	ANSYS vrijeme $t_{8/5}$ [s]	$\Delta t_{8/5}$
<b>Ø95</b>	98	108	10	25	10	15
<b>Ø48</b>	39	35	4	21	9	12
<b>Ø28</b>	19	17	2	14	8	6

Vidljivo je da koeficijent prijelaza topline  $\alpha = 2500 \text{ W/m}^2\text{K}$  puno bolje opisuje krivulju ohlađivanja jezgre u odnosu na referentnu nego li koeficijent iz prethodne iteracije. Međutim, primjećuje se da veća vrijednost koeficijenta prijelaza topline ostvaruje velika odstupanja ohlađivanja površine od referentne krivulje.

Primjećuje se da vrijednost koeficijenta prijelaza topline u velikoj mjeri utječe na izgled krivulje ohlađivanja površine uzorka, budući da se upravo na površini i odvija konvekcija. Promjenom vrijednosti koeficijenta prijelaza topline mijenja se i krivulja ohlađivanja jezgre, međutim ne u tolikoj mjeri koliko krivulja ohlađivanja površine. To se događa iz razloga što se u jezgri odvija provođenje topline, gdje veći značaj ima koeficijent provođenja topline dok na površini uzorka veći utjecaj ima koeficijent prijelaza topline.

Razvojem numeričkog modela sa stacionarnim koeficijentom prijelaza topline uviđa se da se ne može istovremeno na dobar način opisati ohlađivanje u jezgri i na površini uzorka. Ovim bi principom trebalo koristiti dva različita numerička modela, jedan kojim bi se opisivalo ponašanje u jezgri te jedan kojim bi se opisivalo ponašanje na površini. Iako bi to za grube procjene mogao biti validan pristup, u sklopu rada nastoji se razviti unificiran numerički model kojim će se dobiti mjerodavna raspodjela tvrdoća unutar cijelog uzorka.

## 8. KALIBRACIJA NUMERIČKOG MODELA SA NESTACIONARNIM KOEFICIJENTOM PRIJELAZA TOPLINE

Utvrđeno je da korištenje stacionarnog koeficijenta prijelaza topline nije odgovarajuće jer zahtjeva razvoj dva različita numerička modela za jezgru i površinu uzorka. Nastoji se razviti jedan numerički model za simulaciju ohlađivanja kod kaljenja kojim će se istodobno na dobar način opisivati ohlađivanje unutar cijelog uzorka.

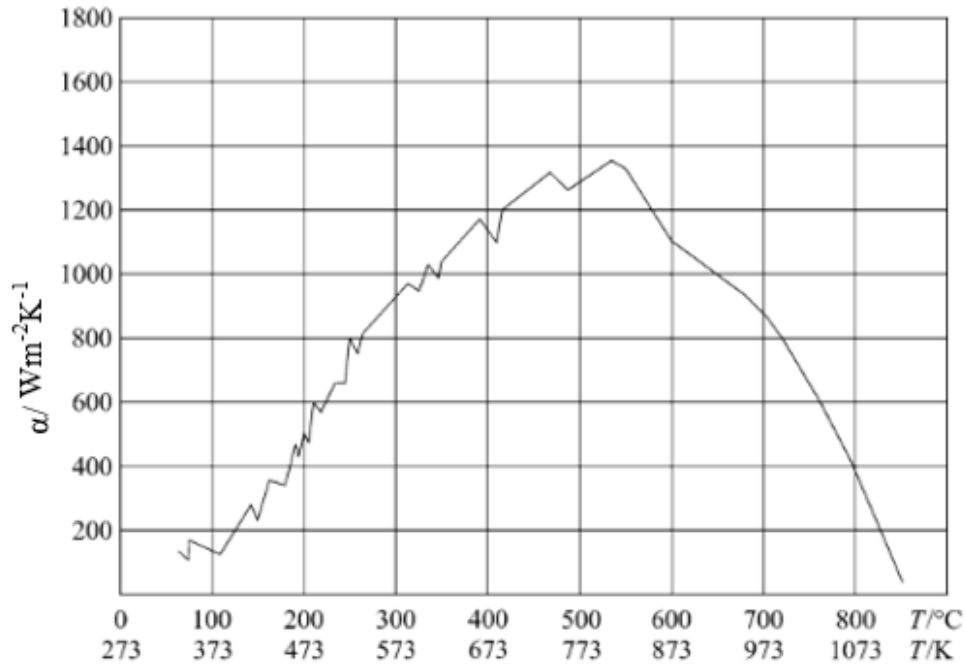
Koeficijent prijelaza topline vrijednost je koja ovisi o mediju i režimu gašenja, te je utvrđeno da njegova vrijednost u velikoj mjeri ovisi o promjeni temperature. Raspodjela vrijednosti koeficijenta prijelaza topline u sklopu rada nije poznata te se određuje iterativno uz korištenje referentnih krivulja ohlađivanja.

Krivulje ohlađivanja uspoređuju se sa referentnima te kalibriraju u području ohlađivanja od 800°C do 500°C budući da je tim područjem određena vrijednost  $t_{8/5}$  koja je u daljnjim koracima mjerodavna za procjenu tvrdoće.

Postupak kalibracije zbog jednostavnosti se inicijalno provodi za uzorak iz materijala 34 Cr 4 promjera Ø48. Nakon toga vrši se validiranje kalibriranih vrijednosti koeficijenta prijelaza topline za uzorke drugih dimenzija.

### 8.1. Prva iteracija – Dobivene krivulje ohlađivanja za varijabilni koeficijent $\alpha$

Kako bi se započela kalibracija koeficijenta prijelaza topline, potrebno je odrediti generalan okvir vrijednosti sa kojima se ulazi u prvu iteraciju. Razmatraju se vrijednosti koeficijenta prijelaza topline u ovisnosti o temperaturi određenih za 42 Cr Mo 4 prikazane na slici 8.1.



Slika 8.1. Pretpostavljena ovisnost koeficijenta prijelaza topline o temperaturi [6]

Na slici 8.1. vidljiv je oblik krivulje koja opisuje ovisnost koeficijenta prijelaza topline i temperature za čelik 42 Cr Mo 4. U daljnjim se koracima kalibriraju krivulje ohlađivanja za materijal 34 Cr 4, međutim budući da su oba materijala čelici za poboljšavanje, u prvoj se fazi (iteraciji) pretpostavlja jednoznačna raspodjela vrijednosti koeficijenta prijelaza topline, nakon čega se, ukoliko je to potrebno, dodatno kalibrira.

U prvoj iteraciji unose se vrijednosti koeficijenta prijelaza topline iz tablice 8.1. koje odgovaraju raspodjeli sa slike 8.1.

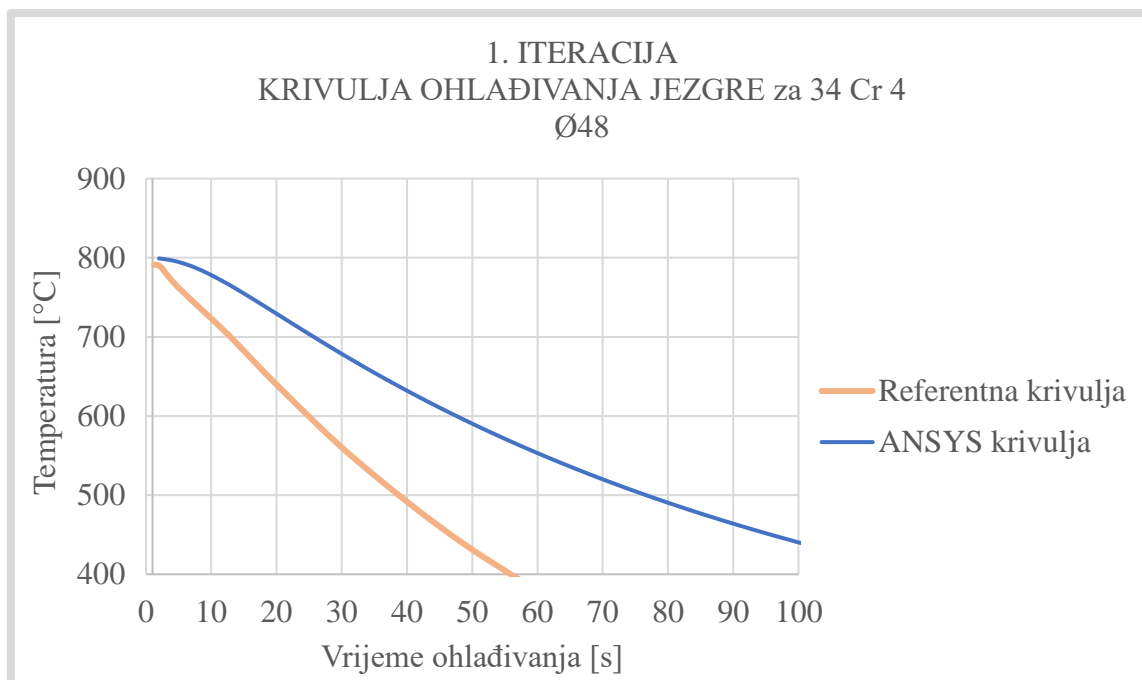


Tablica 8.1. Prva iteracija – Vrijednosti koeficijenta prijelaza topline

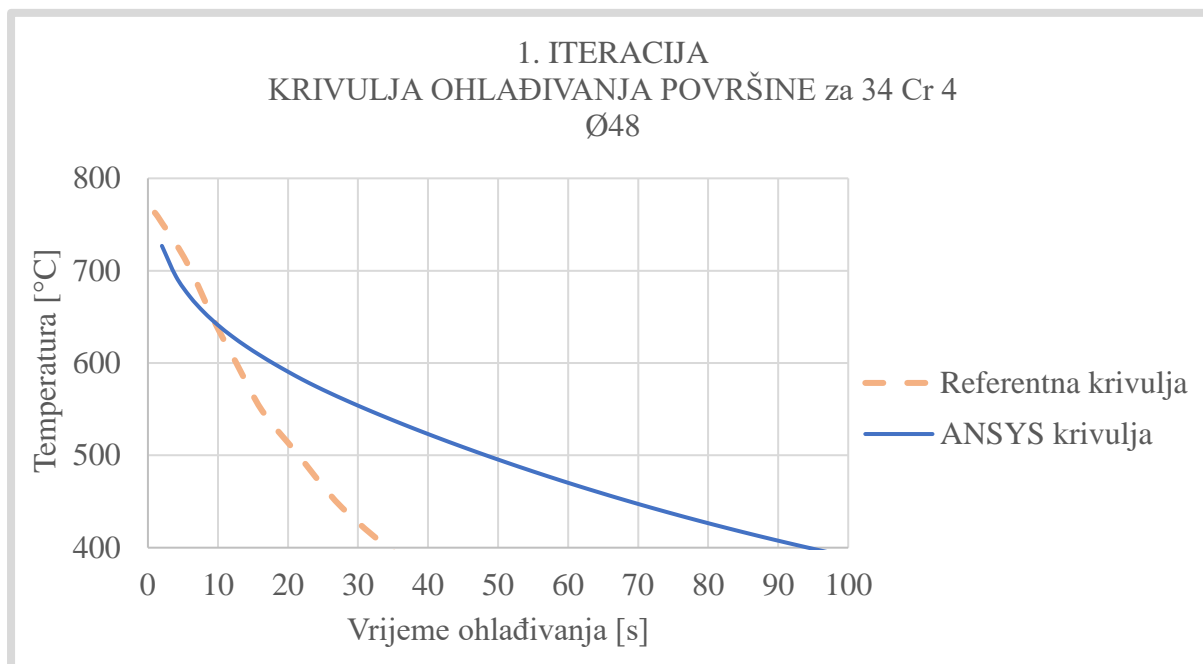
1. ITERACIJA	
$T$ [°C]	$\alpha$ [W/m <sup>2</sup> K]
100	150
200	480
300	920
400	1150
500	1290
600	1100
700	900
800	400

Nakon što su vrijednosti iz tablice 8.1. definirane u numeričkom modelu, generiraju se krivulje hlađenja za dva čvora; u jezgri i na površini uzorka.

Na slici 8.2. prikazana je krivulja hlađenja jezgre uzorka iz 34 Cr 4 promjera Ø48 za vrijednosti koeficijenta prijelaza topline iz tablice 8.1.

Slika 8.2. Prva iteracija – Krivulja hlađenja jezgre Ø48 – Varijabilni koeficijent  $\alpha$

Na slici 8.3. prikazana je krivulja hlađenja površine materijala 34 Cr 4 za Ø48 za vrijednosti koeficijenta prijelaza topline iz tablice 8.1.



Slika 8.3. Prva iteracija – Krivulja hlađenja površine Ø48 – Varijabilni koeficijent  $\alpha$

Sa slike 8.2. i slike 8.3. vidljivo je da krivulje hlađenja koje su dobivene iz numeričkog modela u većoj mjeri odstupaju od referentnih krivulja, te nisu mjerodavne za daljnji proces. Mjerodavna veličina za procjenu tvrdoće koja se promatra je vrijeme ohlađivanja od 800°C do 500°C te je u tablici 8.2. dan prikaz odstupanja  $t_{8/5}$  u odnosu na referentne vrijednosti.

Tablica 8.2. Prva iteracija – Odstupanja  $t_{8/5}$  za varijabilni koeficijent  $\alpha$

	JEZGRA			POVRŠINA		
	Referentno vrijeme $t_{8/5}$ [s]	ANSYS vrijeme $t_{8/5}$ [s]	$\Delta t_{8/5}$	Referentno vrijeme $t_{8/5}$ [s]	ANSYS vrijeme $t_{8/5}$ [s]	$\Delta t_{8/5}$
<b>Ø48</b>	39	77	38	21	50	29

Odstupanja  $t_{8/5}$  su u prvoj iteraciji znatna te je potrebno ponoviti kalibraciju krivulja ohlađivanja. Potrebno je ponoviti proces sa drugačijim vrijednostima koeficijenta prijelaza topline.

## 8.2. Druga iteracija – Dobivene krivulje ohlađivanja za varijabilni koeficijent $\alpha$

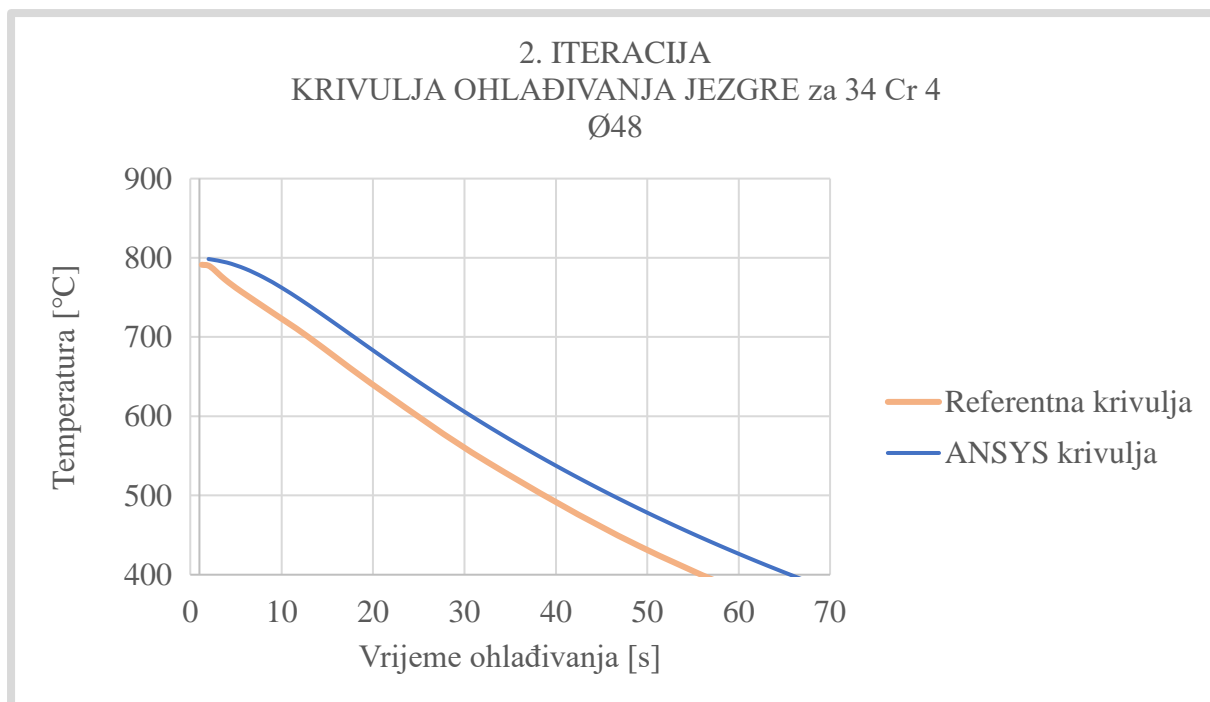
Početna se pretpostavka vrijednosti koeficijenta prijelaza topline prikazana na slici 8.1. prilagođava na način da se zadržava oblik raspodjele vrijednosti, međutim razmatra se slučaj kada vrijednost koeficijenta dosegne 2500 W/m<sup>2</sup>K.

U drugoj iteraciji pretpostavljaju se vrijednosti koeficijenta prijelaza topline iz tablice 8.3.

Tablica 8.3. Druga iteracija – Vrijednosti koeficijenta prijelaza topline

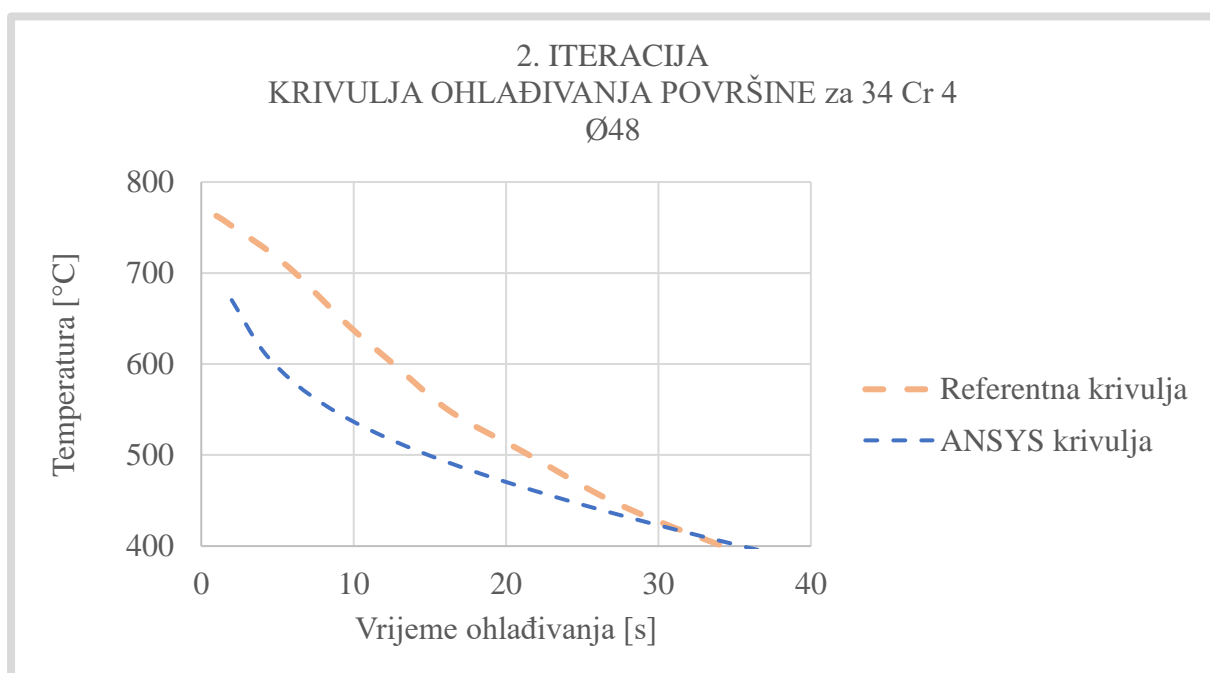
<b>2. ITERACIJA</b>	
<b><math>T</math> [°C]</b>	<b><math>\alpha</math> [W/m<sup>2</sup>K]</b>
100	1200
200	1550
300	2000
400	2220
500	2500
600	2150
700	1950
800	1450

Na slici 8.4. prikazana je krivulja hlađenja jezgre materijala 34 Cr 4 za Ø48 za vrijednosti koeficijenta prijelaza topline iz tablice 8.3.



Slika 8.4. Druga iteracija – Krivulja hlađenja jezgre Ø48 – Varijabilni koeficijent  $\alpha$

Na slici 8.5. prikazana je krivulja hlađenja površine materijala 34 Cr 4 za Ø48 za vrijednosti koeficijenta prijelaza topline iz tablice 8.3.



Slika 8.5. Druga iteracija – Krivulja hlađenja površine Ø48 – Varijabilni koeficijent  $\alpha$

Krivulja ohlađivanja jezgre ostvaruje veliku približnost, međutim krivulja ohlađivanja površine ostvaruje određena odstupanja u prvih tridesetak sekundi. Vidljivo je da se krivulja ohlađivanja površine počinje podudarati sa referentnom između 500°C i 400°C. U svakom je slučaju vidljivo da se već u drugoj iteraciji krivulja ohlađivanja dobivena iz numeričkog modela uvelike približila referentnoj krivulji. U tablici 8.4. dan prikaz odstupanja  $t_{8/5}$  u odnosu na referentne vrijednosti.

Tablica 8.4. Druga iteracija – Odstupanja  $t_{8/5}$  za varijabilni koeficijent  $\alpha$

	JEZGRA			POVRŠINA		
	Referentno vrijeme $t_{8/5}$ [s]	ANSYS vrijeme $t_{8/5}$ [s]	$\Delta t_{8/5}$	Referentno vrijeme $t_{8/5}$ [s]	ANSYS vrijeme $t_{8/5}$ [s]	$\Delta t_{8/5}$
<b>Ø48</b>	39	46	7	21	15	6

Odstupanja vremena ohlađivanja od 800°C do 500°C u drugoj su iteraciji već znatno smanjena. Trećom se iteracijom nastoji vidjeti ukoliko se može ostvariti još bolja podudarnost krivulja ohlađivanja.

### 8.3. Treća iteracija – Dobivene krivulje ohlađivanja za varijabilni koeficijent $\alpha$

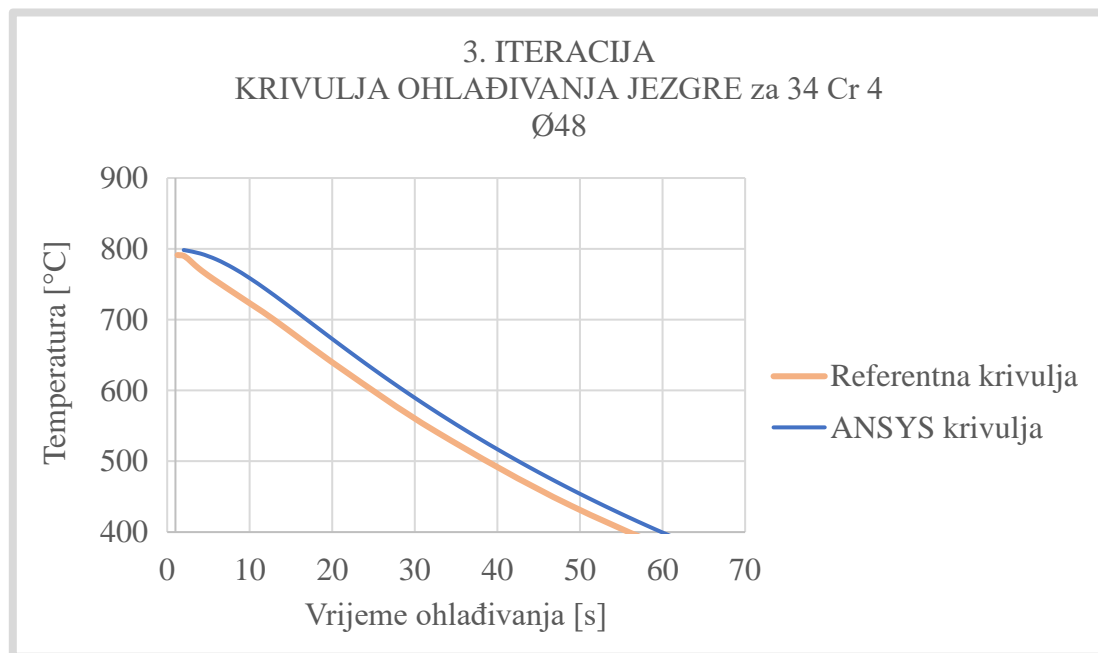
Početna se pretpostavka vrijednosti koeficijenta prijelaza topline prikazana na slici 8.1. prilagođava na način da se zadržava oblik raspodjele vrijednosti, međutim razmatra se slučaj kada vrijednost koeficijenta dosegne 2800 W/m<sup>2</sup>K.

U trećoj iteraciji unose se vrijednosti koeficijenta prijelaza topline iz tablice 8.5.

Tablica 8.5. Treća iteracija – Vrijednosti koeficijenta prijelaza topline

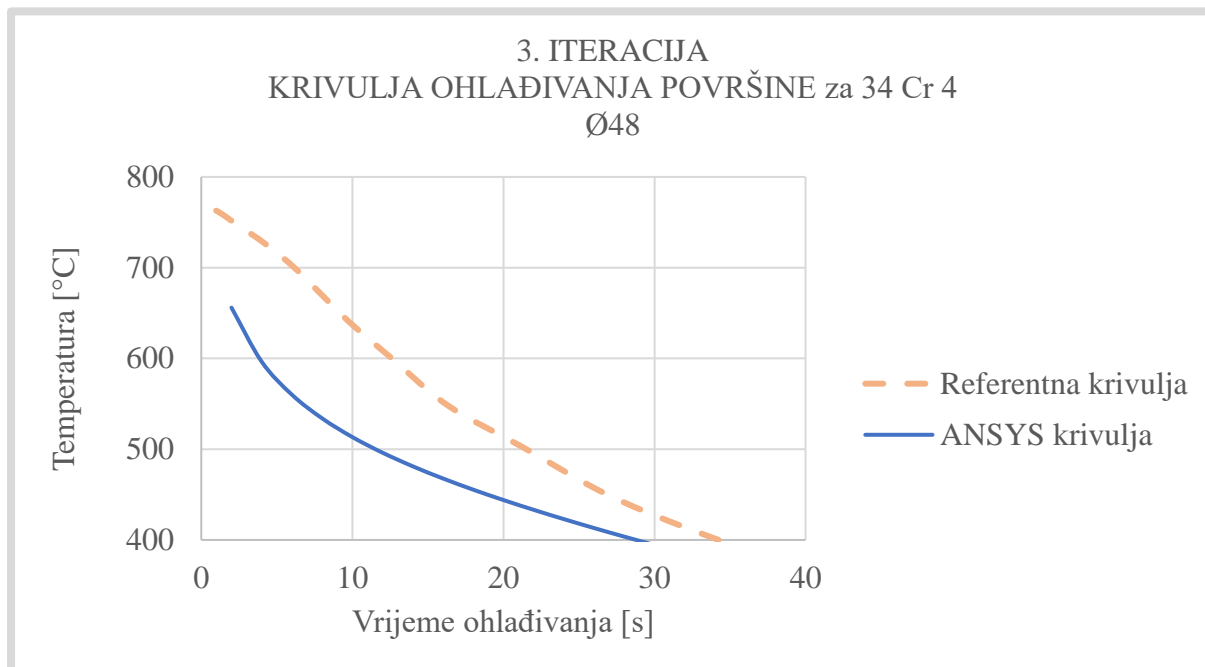
3. ITERACIJA	
$T$ [°C]	$\alpha$ [W/m <sup>2</sup> K]
100	1500
200	1850
300	2300
400	2520
500	2800
600	2450
700	2250
800	1750

Na slici 8.6. prikazana je krivulja hlađenja jezgre materijala 34 Cr 4 za Ø48 za vrijednosti koeficijenta prijelaza topline iz tablice 8.5.



Slika 8.6. Treća iteracija – Krivulja hlađenja jezgre Ø48– Varijabilni koeficijent  $\alpha$

Na slici 8.7. prikazana je krivulja hlađenja površine materijala 34 Cr 4 za Ø48 za vrijednosti koeficijenta prijelaza topline iz tablice 8.5.



Slika 8.7. Treća iteracija – Krivulja hlađenja površine Ø48 – Varijabilni koeficijent  $\alpha$

Primjećuje se da su krivulje ohlađivanja dobivene iz numeričkog modela u trećoj iteraciji tek primjetno različite od krivulja dobivenih u drugoj iteraciji. U tablici 8.6. dan prikaz odstupanja  $t_{8/5}$  u odnosu na referentne vrijednosti.

Tablica 8.6. Treća iteracija – Odstupanja  $t_{8/5}$  za varijabilni koeficijent  $\alpha$

	JEZGRA			POVRŠINA		
	Referentno vrijeme $t_{8/5}$ [s]	ANSYS vrijeme $t_{8/5}$ [s]	$\Delta t_{8/5}$	Referentno vrijeme $t_{8/5}$ [s]	ANSYS vrijeme $t_{8/5}$ [s]	$\Delta t_{8/5}$
<b>Ø48</b>	39	42	3	21	11	10

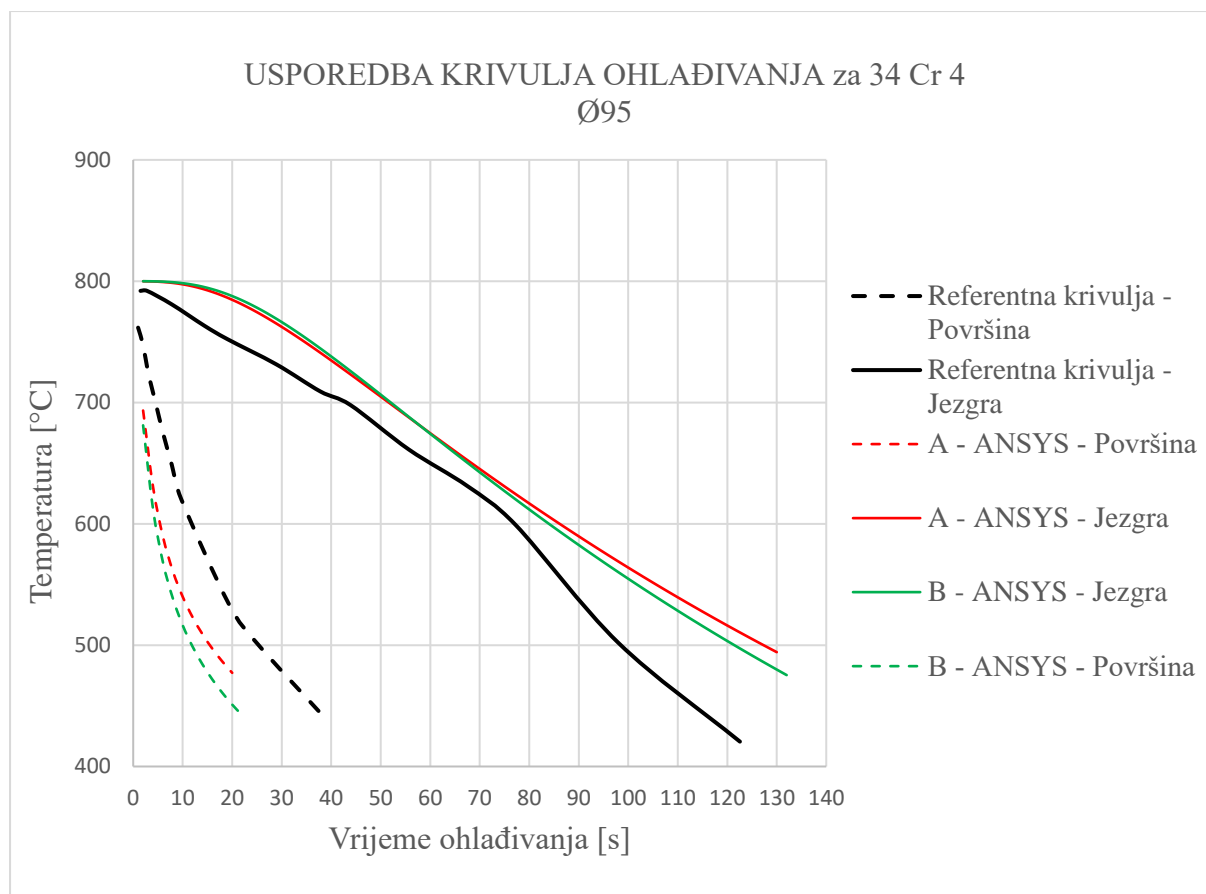
Odstupanje  $t_{8/5}$  se u trećoj iteraciji smanji za jezgru, međutim poveća za površinu. Provjerava se kakve rezultate za vrijednosti koeficijenata prijelaza topline iz druge i treće iteracije ostvaruju numerički modeli za druge dimenzije uzoraka.

#### **8.4. Validacija krivulja ohlađivanja za uzorke različitih dimenzija**

Krivulje ohlađivanja dobivene u drugoj i trećoj iteraciji su vrlo slične. Odstupanje  $t_{8/5}$  se u trećoj iteraciji smanji za jezgru, međutim poveća za površinu. Zbog toga se pristupa provjeri da se vidi kakve rezultate za vrijednosti koeficijenata prijelaza topline iz druge i treće iteracije ostvaruju numerički modeli za druge dimenzije uzoraka. Provodi se numerička analiza za uzorke promjera  $\varnothing 95$  i  $\varnothing 28$  uz korištenje vrijednosti koeficijenta prijelaza topline iz druge iteracije (tablica 8.3.) i treće iteracije (tablica 8.5.). Promatra se područje ohlađivanja od  $800^{\circ}\text{C}$  do  $500^{\circ}\text{C}$  budući da je njime određena vrijednost  $t_{8/5}$  koja je ključna za daljnju procjenu tvrdoće.

Na slici 8.8. prikazane su krivulje hlađenja za uzorak promjera  $\varnothing 95$ . Uspoređuju se numerički dobivene krivulje za vrijednosti koeficijenta prijelaza topline iz druge iteracije (tablica 8.3.), označene kao vrijednosti A te vrijednosti koeficijenta prijelaza topline iz treće iteracije (tablica 8.5.) označene kao vrijednosti B.

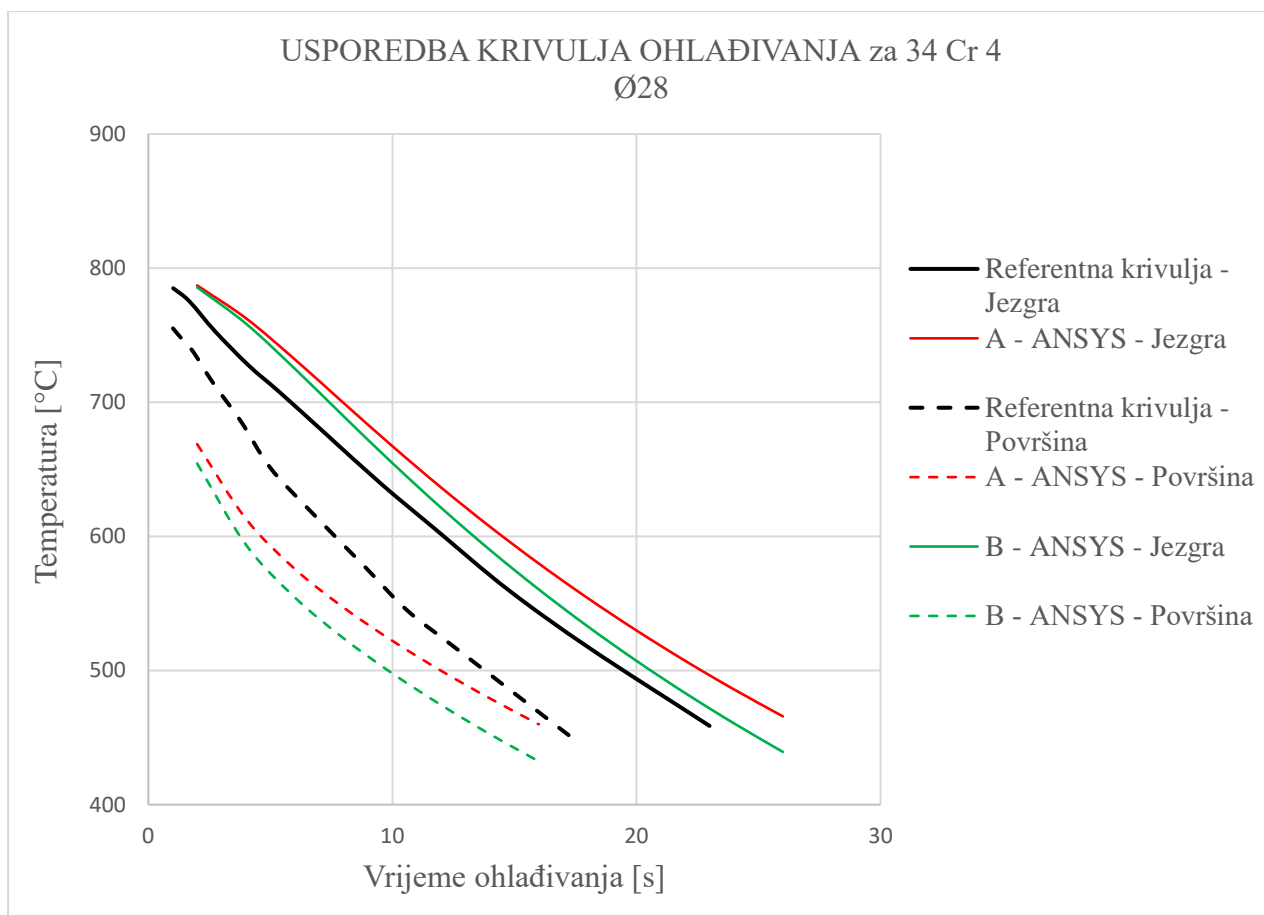




Slika 8.8. Usporedba krivulja ohlađivanja za Ø95

Primjećuje se da je za set vrijednosti koeficijenta prijelaza topline A, krivulja ohlađivanja površine bliža referentnoj, međutim dolazi do obratne situacije kod krivulje ohlađivanja površine, gdje je set podataka B bliži referentnoj krivulji.

Na slici 8.9. je prikazan odnos krivulja ohlađivanja za ispitni uzorak promjera Ø28. Na isti se način uspoređuju numerički dobivene krivulje za vrijednosti koeficijenta prijelaza topline iz druge iteracije (tablica 8.3.), označene kao vrijednosti A te vrijednosti koeficijenta prijelaza topline iz treće iteracije (tablica 8.5.) označene kao vrijednosti B.



Slika 8.9. Usporedba krivulja ohlađivanja za Ø28

Kod ispitnog uzorka promjera Ø28 primjećuje se isti trend kao kod uzorka promjera Ø95. Set vrijednosti koeficijenta prijelaza topline A bolje opisuje krivulju hlađenja za površinu uzorka, međutim set B bolje opisuje krivulju hlađenja za jezgru u odnosu na referentnu.

U tablici 8.7. dan je pregled odstupanja  $t_{8/5}$  za krivulje ohlađivanja uzoraka različitih dimenzija (promjera Ø95 i Ø28).

Tablica 8.7. Odstupanja  $t_{8/5}$  za uzorke različitih promjera

<b>Ø95</b>					
	Referentno vrijeme $t_{8/5}$ [s]	<b>SET A</b> ( 2. iteracija )		<b>SET B</b> ( 3. iteracija )	
		ANSYS vrijeme $t_{8/5}$ [s]	$\Delta t_{8/5}$	ANSYS vrijeme $t_{8/5}$ [s]	$\Delta t_{8/5}$
		<b>JEZGRA</b>	78	127	49
<b>POVRŠINA</b>	25	15	10	11	14

<b>Ø28</b>					
	Referentno vrijeme $t_{8/5}$ [s]	<b>SET A</b> ( 2. iteracija )		<b>SET B</b> ( 3. iteracija )	
		ANSYS vrijeme $t_{8/5}$ [s]	$\Delta t_{8/5}$	ANSYS vrijeme $t_{8/5}$ [s]	$\Delta t_{8/5}$
		<b>JEZGRA</b>	19	23	4
<b>POVRŠINA</b>	14	12	2	10	4

Set vrijednosti koeficijenta prijelaza topline A (2. iteracija) ostvaruje manja odstupanja za površinu uzorka, dok set B (3. iteracija) ostvaruje manja odstupanja za jezgru uzorka. Vidljivo je da kalibrirane vrijednosti koeficijenta prijelaza topline ostvaruju dobre rezultate za manji uzorak promjera Ø28 dok su odstupanja za veći uzorak Ø95 značajnija. Pretpostavlja se da je to posljedica što se kod razvoja modela koristila stacionarna vrijednost koeficijenta provođenja topline. Ova pretpostavka je validna kod uzoraka manjih dimenzija gdje koeficijent provođenja topline nema značajniji utjecaj. Međutim kod uzorka većih dimenzija značajnu ulogu ima i koeficijent provođenja topline te se zaključuje da za veće uzorke aproksimacija koeficijenta  $\lambda$  nije najbolje rješenje. U sklopu diplomskog rada nastavlja se raditi sa razvijenim numeričkim modelom ali je definiran razlog mogućih odstupanja.

Iako se kod postavljanja numeričkog modela nastoji se dobiti čim vjerodostojnija raspodjela tvrdoće nakon kaljenja unutar cijelog uzorka u sklopu rada prednost se daje promatranju tvrdoće površine, budući da se otpornost na mehanička oštećenja nastoji ostvariti upravo na površinskim dijelovima. Zbog toga se u nastavku kao mjerodavne koriste vrijednosti koeficijenta prijelaza topline A (tablica 8.3.) koje su bolje opisale ponašanje krivulje hlađenja površine uzorka.

## 9. VERIFIKACIJA RAZVIJENOG MODELA NA TEMELJU PROCIJENJENIH VRIJEDNOSTI TVRDOĆE

Numerički model verificiran je na način da su se numerički generirane krivulje hlađenja za jezgru i površinu usporedile sa referentnim eksperimentalno dobivenim krivuljama te je utvrđeno da numerički model generira mjerodavne krivulje ohlađivanja za različite geometrije ispitnih uzorka. Unutar paketa ANSYS numeričkim je putem opisano gašenje metalnog uzorka, te se kao rezultat analize generira ovisnost temperature i vremena hlađenja za pojedini čvor. Krivulje hlađenja važan su podatak kada se promatra proces gašenja, međutim ključno svojstvo koje se promatra nakon kaljenja jest postignuta tvrdoća.

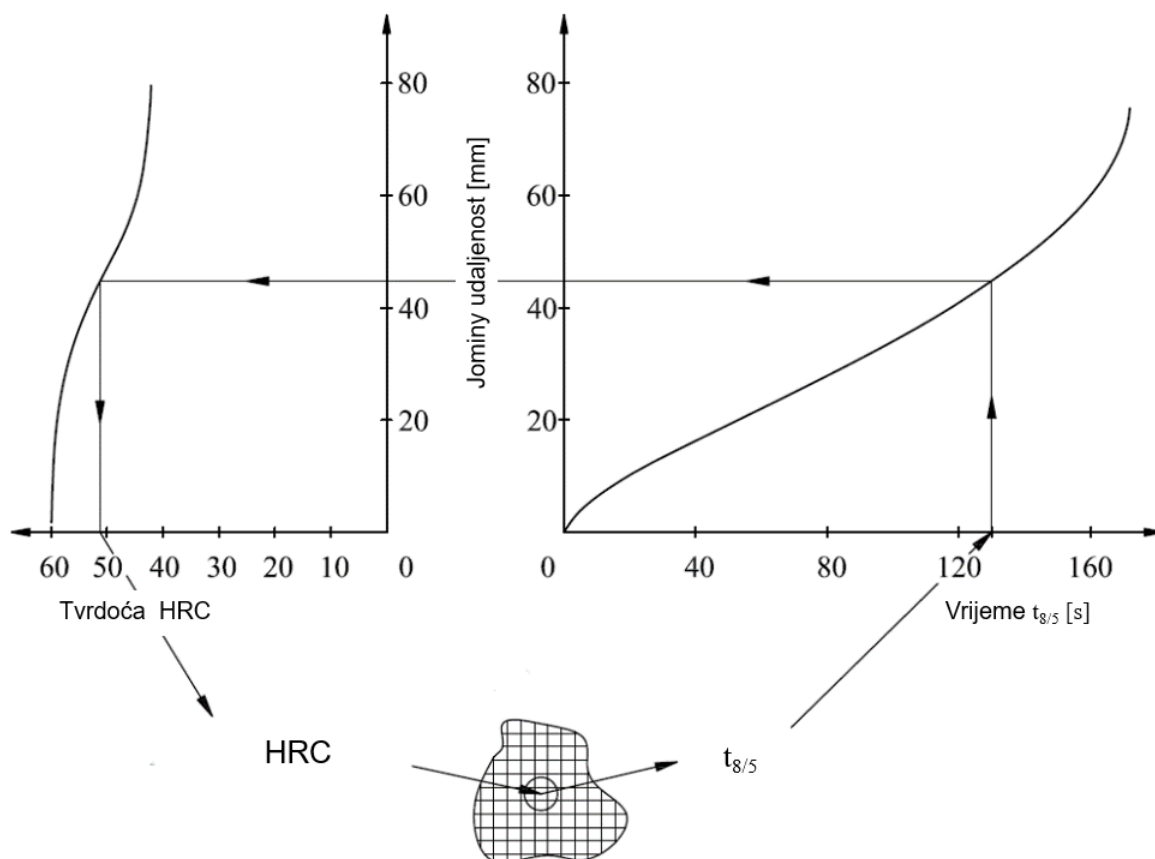
U sklopu diplomskog rada nastoji se razviti numerički model koji bi se ostvarila mogućnost procjene tvrdoće čeličnog uzorka nakon kaljenja. Kalibracijom i verificiranjem su postignute zadovoljavajuće numerički dobivene krivulje ohlađivanja te se na temelju njih u nastavku nastoji procijeniti tvrdoća metalnog uzorka. Tvrdoća dobivena korištenjem numeričkog modela se uspoređuje sa eksperimentalno određenom tvrdoćom čeličnog uzorka nakon kaljenja, čime se točnost numeričkog modela dodatno verificira.

### 9.1. Opis postupka određivanja tvrdoće

Na temelju generiranih krivulja hlađenja određuje se vrijednost  $t_{8/5}$  pomoću koje se analitički određuje postignuta tvrdoća za pojedine čvorove. Za određivanje tvrdoće na temelju krivulja ohlađivanja, koriste se dva dijagrama:

- Dijagram ovisnosti vremena  $t_{8/5}$  i Jominy udaljenosti
- Jominy dijagram (za promatrani materijal)

Na slici 9.1. shematski je prikazan način na koji se opisuje proces određivanja tvrdoće iz krivulja ohlađivanja.



Slika 9.1. Prikaz procesa određivanja tvrdoće [6]

Prema slici 9.1. vidljivo je da za pojedini čvor uzorka potrebno odrediti  $t_{8/5}$ , odnosno vrijeme koje je potrebno da se taj čvor ohladi od  $800^{\circ}\text{C}$  do  $500^{\circ}\text{C}$ . Za određivanje  $t_{8/5}$  koriste se numerički generirane krivulje ohlađivanja. Nakon što je poznato koliko iznosi  $t_{8/5}$  sa tom se vrijednošću pristupa dijagramu koji opisuje ovisnost  $t_{8/5}$  i Jominy udaljenosti, a mjerodavan je za sve čelike za poboljšavanje. Nakon što je određena Jominy udaljenost pristupa se dijagramu gdje se promatra odnos Jominy udaljenosti i postignute tvrdoće. Ovaj dijagram ovisi o materijalu koji se promatra te je za njega jedinstven. Završetkom ovog postupka određena je postignuta tvrdoća za određeni čvor uzorka nakon kaljenja.

## 9.2. Opis referentnog uzorka Ø90x200 iz 42CrMo4

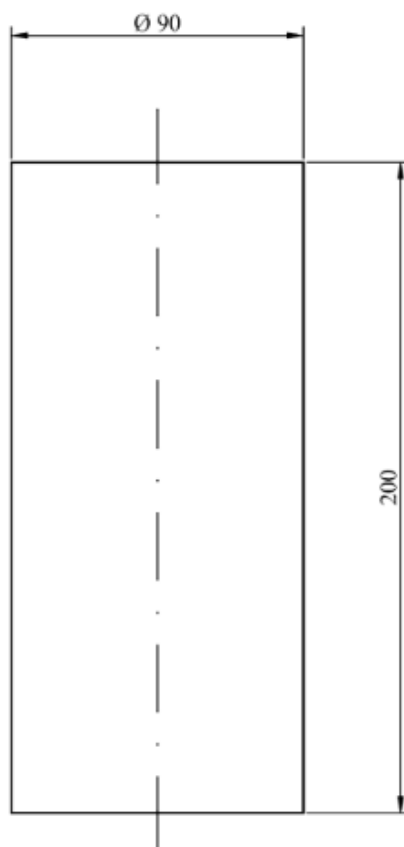
U sklopu diplomskog rada nastoji se razviti numerički model kojim bi se ostvarila mogućnost procjene tvrdoće čeličnog uzorka nakon kaljenja. Na temelju numerički dobivenih krivulja ohlađivanja procjenjuje se tvrdoća određenog čvora uzorka. Provjera mjerodavnosti numerički dobivenih vrijednosti tvrdoće vrši se na temelju usporedbe se eksperimentalno određenom tvrdoćom nakon kaljenja za uzorak iz materijala 42 Cr Mo 4 koji u ovom dijelu rada služi kao referentni uzorak.

Referentni uzorak izrađen je iz materijala 42 Cr Mo 4. U tablici 9.1. dan je pregled kemijskog sastava čelika iz kojeg je izrađen referentni uzorak.

Tablica 9.1. Kemijski sastav čelika 42 Cr Mo 4 [6]

	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>
42CrMo4	0.42	0.21	0.63	0.012	0.020	1.09	0.23

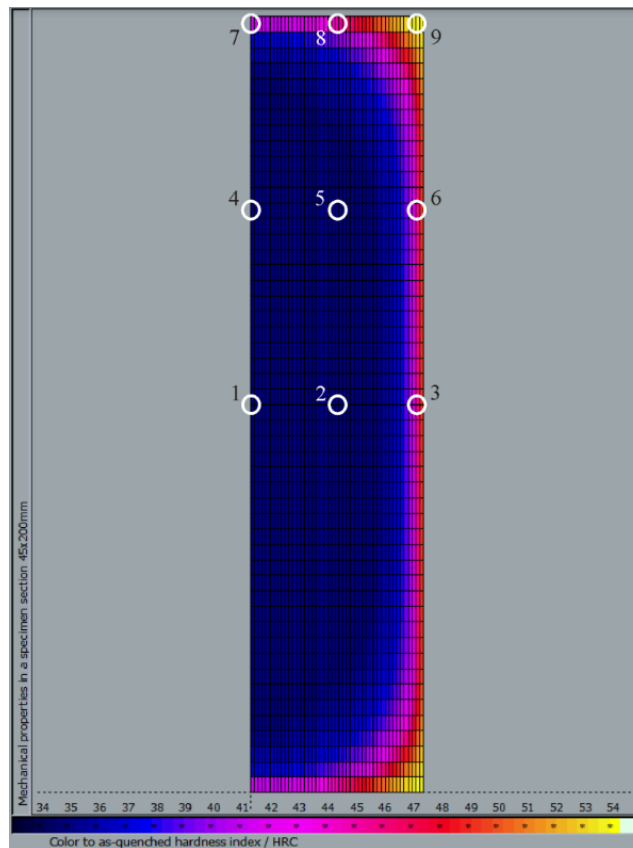
Referentni uzorak je epruveta promjera Ø90, duljine 200 mm. Na slici 9.2. prikazana je geometrija uzorka za kojega je tvrdoća nakon kaljenja eksperimentalno određena.



*Slika 9.2. Geometrija uzorka iz 42CrMo4 [6]*

Postupak kaljenja referentnog uzorka proveden je za temperaturu austenitizacije 850°C dok je gašenje provedeno u mineralnom ulju držanom na temperaturi 20°C bez miješanja. [6] Na slici 9.3. prikazana je simulacija ohlađivanja referentnog uzorka te su naznačeni čvorovi za koje se provodilo eksperimentalno mjerenje tvrdoće nakon kaljenja.





Slika 9.3. Simulacija referentnog uzorka sa naznačenim točkama mjerene tvrdoće [6]

Prema Rockwellu su izmjerene vrijednosti tvrdoće za naznačene čvorove te su eksperimentalno određene vrijednosti za pojedini čvor prikazane u tablici 9.2. [6]

Tablica 9.2. Eksperimentalno određena tvrdoća za Ø90 iz 42CrMo4 [6]

ČVOR	TVRDOĆA HRC
1	33
2	34
3	49
4	33
5	35
6	49
7	37
8	45
9	51

### 9.3. Izrada numeričkog modela prema referentnom uzorku

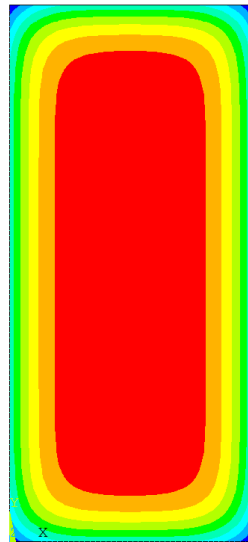
Izrađuje se numerički model po uzoru na referentni uzorak kako bi se mogle usporediti i validirati vrijednosti numerički procijenjene tvrdoće sa onima koje su eksperimentalno određene. APDL kod u ANSYS-u se prilagođava na način da numerički model preslikava slučaj gašenja referentnog uzorka.

Numerički model za simulaciju gašenja uzorka Ø90x200 iz 42 Cr Mo 4 u ulju definiran je podacima iz tablice 9.3.

Tablica 9.3. Parametri numeričke analize za model Ø90x200 iz 42CrMo4

<b>Vrsta analize</b>	Nestacionarna toplinska analiza	
<b>Vrsta elementa</b>	„PLANE55“ – ravninski 2D element	
<b>Svojstva materijala</b>	42 Cr Mo 4	$\lambda = 46 \text{ W/mK}$
		$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$
		$c = 460 \text{ J/kgK}$
<b>Geometrija ( dimenzije )</b>	90x200	
<b>Veličina konačnog elementa ( omreženje )</b>	0,0015	
<b>Veličina vremenskog koraka</b>	1 s	
<b>Rubni uvjet</b>	Početna temperatura 800°C u svakom čvoru	
<b>Opterećenje</b>	Konvekcija na svim rubnim linijama	
	Koeficijent $\alpha$ za ulje iz tablice 8.3.	

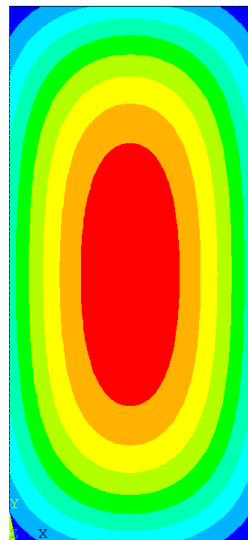
Provodi se numerička analiza te je simulacija ohlađivanja prikazana na slici 9.4. gdje je vidljiva raspodjela temperatura u uzorku nakon 10 s, 80 s i 150 s od početka gašenja.



```

ANSYS 2023 R1
Build 23.1
APR 26 2024
12:07:27
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =5
TIME=10
TEMP      (AVG)
RSYS=0
PowerGraphics
EFACET=1
AVRES=Mat
SMN  =390.565
SMX  =798.235
390.565
435.862
481.158
526.455
571.752
617.048
662.345
707.642
752.938
798.235

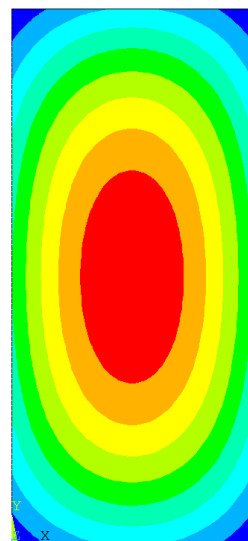
```



```

ANSYS 2023 R1
Build 23.1
APR 26 2024
12:15:27
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =40
TIME=80
TEMP      (AVG)
RSYS=0
PowerGraphics
EFACET=1
AVRES=Mat
SMN  =185.896
SMX  =598.523
185.896
231.743
277.591
323.438
369.285
415.133
460.98
506.828
552.675
598.523

```



```

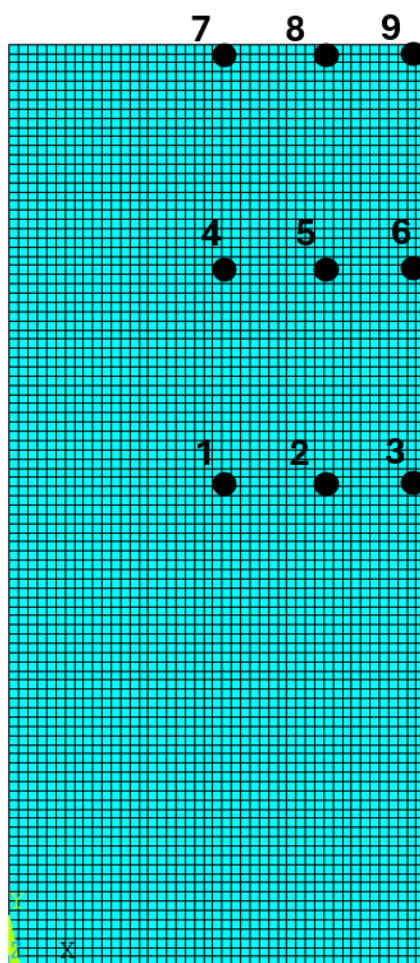
ANSYS 2023 R1
Build 23.1
APR 26 2024
12:13:50
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =75
TIME=150
TEMP      (AVG)
RSYS=0
PowerGraphics
EFACET=1
AVRES=Mat
SMN  =125.311
SMX  =408.877
125.311
156.818
188.325
219.833
251.34
282.847
314.355
345.862
377.37
408.877

```

Slika 9.4. Simulacija hlađenja uzorka  $\varnothing 90$  iz 42CrMo4 – prikaz raspodjela temperatura

#### 9.4. Verifikacija postignute tvrdoće numeričkog modela

Pomoću definiranog numeričkog modela određuje se vrijeme potrebno za ohlađivanje od 800°C do 500°C ( $t_{8/5}$ ). Vrijednost  $t_{8/5}$  koristi se za analitičku procjenu tvrdoće nakon kaljenja. Na numeričkom se modelu određuje  $t_{8/5}$  u čvorovima koji odgovaraju točkama za koje je eksperimentalno određena tvrdoća referentnog uzorka. Na slici 9.5. prikazani su naznačeni čvorovi koji pozicijom odgovaraju čvorovima referentnog uzorka za koje je izmjerena tvrdoća (prema slici 9.3.).



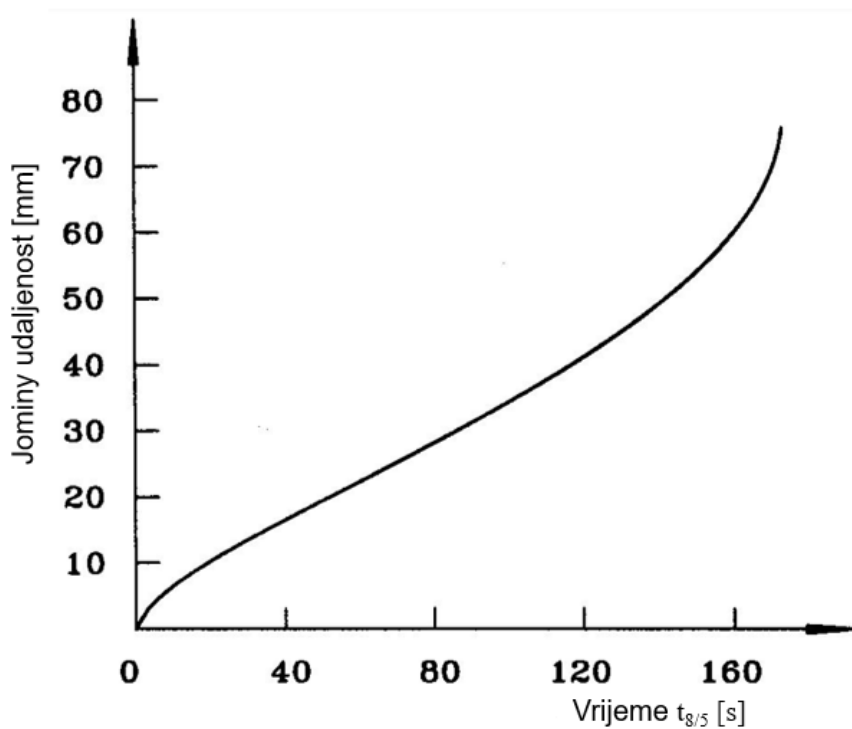
Slika 9.5. Numerički model sa naznačenim čvorovima za procjenu tvrdoće

U tablici 9.4. dan je pregled vrijednosti  $t_{8/5}$  po čvorovima čija je pozicija prikazana na slici 9.5. te je vidljivo koliko je vremena trebalo da u pojedinom čvoru temperatura padne sa 800°C na 500°C.

Tablica 9.4. Raspodjela  $t_{8/5}$  po čvorovima za  $\varnothing 90$  iz 42CrMo4

ČVOR	$t_{8/5}$ [s]
1	113
2	90
3	15,75
4	95
5	79
6	15
7	26
8	22
9	9,7

Nakon što su određene vrijednosti  $t_{8/5}$  sa njima se ulazi u dijagram ovisnosti  $t_{8/5}$  i Jominy udaljenosti prikazan na slici 9.6. Ovaj dijagram jednoznačan je i može se koristiti za sve čelike za poboljšavanje.

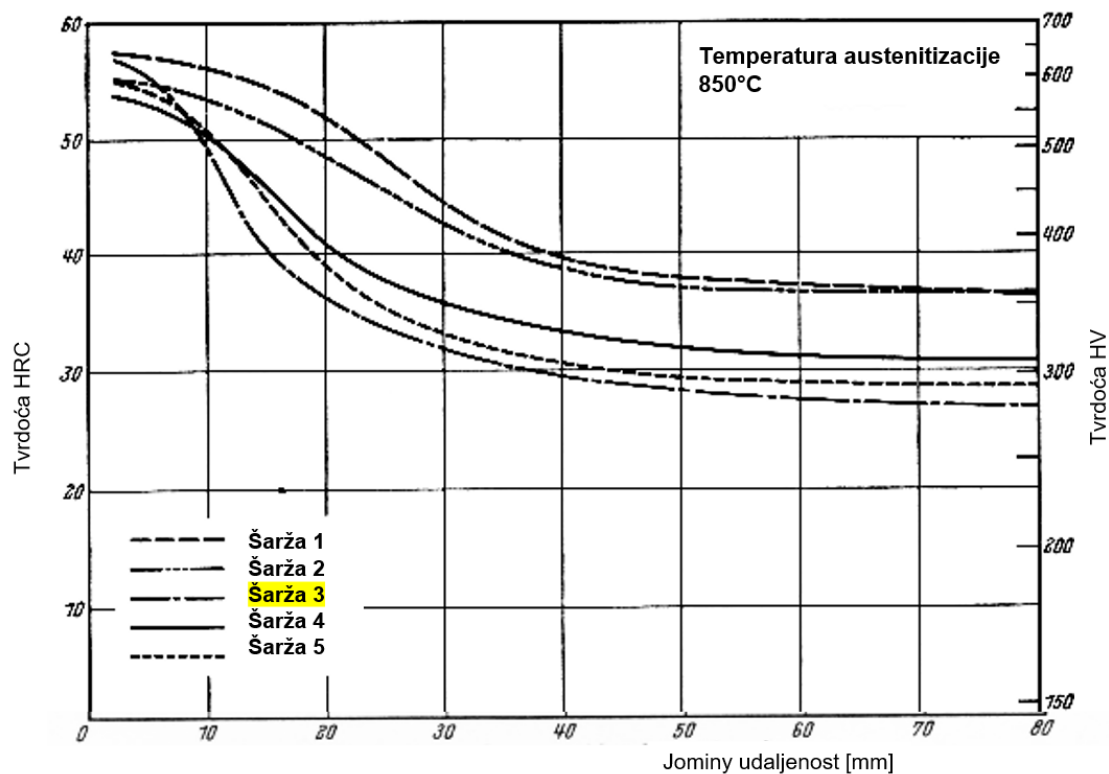
Slika 9.6. Dijagram  $t_{8/5}$  - Jominy udaljenost za čelike za poboljšavanje [6]

Iz dijagrama sa slike 9.6. grafički se određuje Jominy udaljenost za promatrane čvorove uzorka na temelju definiranog  $t_{8/5}$  u tablici 9.4. Za dane su čvorove prikazane određene vrijednosti Jominy udaljenosti u tablici 9.5.

Tablica 9.5. Jominy udaljenost po čvorovima za Ø90 iz 42CrMo4

ČVOR	$t_{8/5}$ [s]	JOMINY UDALJENOST [mm]
1	113	39
2	90	31
3	15,75	8,7
4	95	32
5	79	27,5
6	15	8,5
7	26	12,6
8	22	10,8
9	9,7	6,3

Jominy udaljenost je određena te se koristi Jominy dijagram kako bi se u svakom od čvorova odredila tvrdoća. Ovaj je dijagram svojevrsan za svaki materijal, pa je tako na slici 9.7. prikazan dijagram koji odgovara materijalu 42CrMo4.



Slika 9.7. Jominy dijagram za 42CrMo4 [8]

Na temelju dijagrama sa slike 9.7. grafički se određuje tvrdoća HRC na temelju Jominy udaljenosti za promatrane čvorove. U tablici 9.6. dan je pregled određene tvrdoće nakon kaljenja po čvorovima.

Tablica 9.6. Određena tvrdoća po čvorovima za Ø90 iz 42CrMo4 nakon kaljenja

ČVOR	TVRDOĆA HRC
1	29,7
2	31,6
3	51,4
4	31
5	32,7
6	51,7
7	44
8	47
9	54

Uspoređuje se određena tvrdoća dobivena numeričkim putem sa onom koja je eksperimentalno mjerena za referentni uzorak Ø90 iz 42CrMo4, te su u tablici 9.7. prikazana odstupanja

Tablica 9.7. Usporedba numerički dobivenih i eksperimentalnih tvrdoća

ČVOR	EKSPERIMENTALNA TVRDOĆA HRC	NUMERIČKA TVRDOĆA HRC	ODSTUPANJE $\Delta$ HRC	$\Delta$ HRC [%]
1	33	29,7	3,3	10
2	34	31,6	2,4	7
3	49	51,4	2,4	4,9
4	33	31	2	6
5	35	32,7	2,3	6,6
6	49	48,2	0,8	1,6
7	37	44	7	19
8	45	47	2	4,4
9	51	54	3	5,9

Najveće odstupanje koje se pojavljuje je odstupanje od 7 HRC u čvoru 7, to je odstupanje od 19% te se smatra prihvatljivim. Izuzev navedenog, odstupanja u svim čvorovima su manja od 10% te se zaključuje da se je numeričkim modelom mjerodavno predvidjela tvrdoća unutar cijelog uzorka za ispitni uzorak Ø90 iz 42CrMo4.

Predviđa se da bi se odstupanja mogla smanjiti integracijom nestacionarnog koeficijenta provođenja topline. Na taj bi se način točnije opisalo odvođenje topline unutar uzorka te se razmatra mogućnost da bi se odstupanja procijenjene tvrdoće smanjila za uzorke većih dimenzija.



## 10. ZAKLJUČAK

Diplomski rad obuhvaća razvoj numeričkog modela temeljenog na metodi konačnih elemenata za procjenu tvrdoće čeličnog uzorka nakon kaljenja. Obuhvaćen je cjelokupni pregled procesa toplinske obrade te se nastojalo steći dobro razumijevanje mikrostrukturnih pretvorbi i mehanizama ostvarenja visoke tvrdoće kod procesa kaljenja. Razmotreni su utjecajni parametri procesa gašenja te se promatrao njihov utjecaj na ostvarivanje visoke tvrdoće kod čeličnih ispitnih uzoraka. Nakon što su definirani utjecajni parametri procesa gašenja i nakon što se postiglo razumijevanje njihovog utjecaja na sam proces kaljenja, pristupa se izradi i modeliranju numeričkog modela. Za razvoj numeričkog modela koristi se ANSYS *Mechanical*, program temeljen na metodi konačnih elemenata čijim se modulima za toplinsku analizu nastoji simulirati proces gašenja. Razvojem parametarski definiranog modela otvara se mogućnost za simulaciju gašenja uzoraka različitih dimenzija i različitih vrsta čelika. Razvoj numeričkog modela cijelo je vrijeme popraćen validacijom u odnosu na referentne eksperimentalno određene vrijednosti iz literature. Numeričkim se modelom generiraju krivulje ohlađivanja za pojedini čvor, na temelju kojih se zatim analitički određuje tvrdoća koristeći Jominy dijagrame. Tijekom razvoja numeričkog modela uviđa se visoka utjecajnost koeficijenta prijelaza topline i njegova nezanemariva nestacionarnost, odnosno ovisnost o temperaturi. Uspoređuju se krivulje ohlađivanja dobivene korištenjem stacionarnog i nestacionarnog koeficijenta prijelaza topline. Zaključuje se da nestacionarnost ovog koeficijenta nije zanemariva te se u daljnjim koracima pristupa iterativnoj kalibraciji nestacionarnog koeficijenta prijelaza topline. Nakon što su kalibrirane i postignute krivulje ohlađivanja koje odgovaraju referentnima iz literature, pristupa se validaciji procjene tvrdoće koja se ostvaruje numeričkom modelom. Uspoređuje se slučaj eksperimentalno određenih tvrdoća za uzorak iz 42CrMo4 i onih koje se za isti uzorak dobiju numerički. Najveće odstupanje numeričkog modela u odnosu na ispitno određenu tvrdoću je 7 HRC. Mogućnost kojom se sugerira ostvarenje još točnijih rezultata je korištenje nestacionarnog koeficijenta provođenja topline, što u sklopu ovog rada nije napravljeno jer prelazi obim zadatka. Međutim ostvareni rezultati su zadovoljavajući te se smatra da je razvijeni model mjerodavan za procjenu tvrdoće čeličnog uzorka nakon kaljenja.

## 11. LITERATURA

- [1] Smoljan, B.: "Toplinska obrada čelika, sivog i nodularnog lijeva", Zagreb, 1999.
- [2] Sild, S.: „Quenching Explained – Definition, Process, Benefits and More“, s Interneta, <https://fractory.com/quenching-explained/>, 11. ožujka 2024.
- [3] Gabrić, I.: „Praktikum za laboratorijske vježbe“, Sveučilište u Splitu, Split, 2018.
- [4] Gür, C. H., Simsir, C.: „Simulation of Quenching: A Review“, s Interneta, <https://www.researchgate.net/>, 11. ožujka 2024.
- [5] MacKenzie, D.S.: „Back to basics: The mechanism of quenching“, s Interneta, <https://gearsolutions.com/departments/hot-seat/back-to-basics-the-mechanism-of-quenching/>, 11. ožujka 2024.
- [6] Smoljan, B., Iljkić, D., Totten, E.: „Mathematical Modeling and Simulation of Hardness of Quenched and Tempered Steel“, 2015.
- [7] Engineering ToolBox: „AISI Stainless Steel – Properties“, s Interneta, [https://www.engineeringtoolbox.com/stainless-steel-310-properties-d\\_2167.html](https://www.engineeringtoolbox.com/stainless-steel-310-properties-d_2167.html), 24.3.2024.
- [8] Max Planck Institute: „Atlas zur wärmebehandlung der stähle“, Verlag Stahleisen, 1954.
- [9] Comsol: „Finite Element Mesh Refinement“, s Interneta, <https://www.comsol.com/multiphysics/mesh-refinement>, 11. ožujak 2024.
- [10] Halden, s Interneta, <https://www.round-bars.com/>, 11. ožujka 2024.

**12. POPIS OZNAKA**

$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća
$c$	J/kgK	Specifični toplinski kapacitet
$\lambda$	W/m <sup>2</sup> K	Koeficijent provođenja topline
$\alpha$	W/m <sup>2</sup> K	Koeficijent prijelaza topline
$t_{8/5}$	s	Vrijeme hlađenja od 800°C do 500°C
$M_s$	°C	Početna temperatura stvaranja martenzita
$M_f$	°C	Konačna temperatura stvaranja martenzita
$T_s$	°C	Temperatura na površini stijenke uzorka
$T_f$	°C	Temperatura rashladnog medija

### 13. POPIS SLIKA

Slika 2.1. Pojednostavljeni prikaz faznih pretvorbi kod kaljenja [2].....	3
Slika 2.2. Dijagram tvorbe austenita za kontinuirano grijanje [1].....	5
Slika 2.3. Perlitna pretvorba [1].....	6
Slika 2.4. Martenzitna struktura [1].....	7
Slika 2.5. Tvrdoće faza u čeliku [1].....	9
Slika 2.6. TTT dijagram za kontinuirano ohlađivanje [1].....	10
Slika 3.1. Prikaz parametara Jominy metode [3].....	14
Slika 4.1. Gašenje - Faza parnog omotača [5].....	17
Slika 4.2. Gašenje - Faza vrenja [5].....	18
Slika 4.3. Gašenje - Faza konvekcije [5].....	18
Slika 4.4. Ovisnost gustoće čelika AISI 310 o temperaturi [7].....	21
Slika 4.5. Ovisnost specifičnog toplinskog kapaciteta čelika AISI 310 o temperaturi [7].....	22
Slika 4.6. Ovisnost koeficijenta provođenja topline čelika AISI 310 o temperaturi [7].....	23
Slika 4.7. Raspodjela koeficijenta prijelaza topline za gašenje bez miješanja [6].....	25
Slika 4.8. Raspodjela koeficijenta prijelaza topline za gašenje sa miješanjem [6].....	25
Slika 5.1. Isječak iz literature sa prikazom referentnih krivulja ohlađivanja [8].....	28
Slika 5.2. Primjer mreže konačnih elemenata [9].....	29
Slika 5.3. Primjer izrađenog numeričkog modela dimenzija 95x475.....	32
Slika 5.4. Konvergencija mreže za numeričke modele različitih dimenzija.....	33
Slika 5.5. Prikaz omreženih numeričkih modela.....	34
Slika 5.6. Prikaz definiranog odvođenja topline na rubnim linijama.....	37
Slika 6.1. Referentne krivulje ohlađivanja - Ø95 – 34 Cr 4 [8].....	40
Slika 6.2. Referentne krivulje ohlađivanja – Ø48 – 34 Cr 4 [8].....	40
Slika 6.3. Referentne krivulje ohlađivanja – Ø28 – 34 Cr 4 [8].....	41
Slika 7.1. Prva iteracija – Krivulje ohlađivanja za stacionarni $\alpha = 1700 \text{ W/m}^2\text{K}$ .....	43
Slika 7.2. Druga iteracija – Krivulje ohlađivanja za stacionarni $\alpha = 2500 \text{ W/m}^2\text{K}$ .....	45
Slika 8.1. Pretpostavljena ovisnost koeficijenta prijelaza topline o temperaturi [6].....	48
Slika 8.2. Prva iteracija – Krivulja hlađenja jezgre Ø48 – Varijabilni koeficijent $\alpha$ .....	49
Slika 8.3. Prva iteracija – Krivulja hlađenja površine Ø48 – Varijabilni koeficijent $\alpha$ .....	50
Slika 8.4. Druga iteracija – Krivulja hlađenja jezgre Ø48 – Varijabilni koeficijent $\alpha$ .....	52
Slika 8.5. Druga iteracija – Krivulja hlađenja površine Ø48 – Varijabilni koeficijent $\alpha$ .....	52

---

Slika 8.6. Treća iteracija – Krivulja hlađenja jezgre Ø48– Varijabilni koeficijent $\alpha$ .....	54
Slika 8.7. Treća iteracija – Krivulja hlađenja površine Ø48 – Varijabilni koeficijent $\alpha$ .....	55
Slika 8.8. Usporedba krivulja ohlađivanja za Ø95 .....	57
Slika 8.9. Usporedba krivulja ohlađivanja za Ø28 .....	58
Slika 9.1. Prikaz procesa određivanja tvrdoće [6] .....	62
Slika 9.2. Geometrija uzorka iz 42CrMo4 [6] .....	64
Slika 9.3. Simulacija referentnog uzorka sa naznačenim točkama mjerene tvrdoće [6] .....	65
Slika 9.4. Simulacija hlađenja uzorka Ø90 iz 42CrMo4 – prikaz raspodjela temperatura .....	67
Slika 9.5. Numerički model sa naznačenim čvorovima za procjenu tvrdoće .....	68
Slika 9.6. Dijagram $t_{8/5}$ - Jominy udaljenost za čelike za poboljšavanje [6] .....	69
Slika 9.7. Jominy dijagram za 42CrMo4 [8].....	71

## 14. POPIS TABLICA

Tablica 3.1. Pregled programskih paketa za toplinsku obradu [4].....	15
Tablica 5.1. Informacije o referentnim uzorcima.....	31
Tablica 5.2. Svojstva promatranih čelika [10] .....	35
Tablica 7.1. Prva iteracija – Odstupanja $t_{8/5}$ za stacionarni $\alpha = 1700 \text{ W/m}^2\text{K}$ .....	44
Tablica 7.2. Druga iteracija – Odstupanja $t_{8/5}$ za stacionarni $\alpha = 2500 \text{ W/m}^2\text{K}$ .....	46
Tablica 8.1. Prva iteracija – Vrijednosti koeficijenta prijelaza topline .....	49
Tablica 8.2. Prva iteracija – Odstupanja $t_{8/5}$ za varijabilni koeficijent $\alpha$ .....	50
Tablica 8.3. Druga iteracija – Vrijednosti koeficijenta prijelaza topline .....	51
Tablica 8.4. Druga iteracija – Odstupanja $t_{8/5}$ za varijabilni koeficijent $\alpha$ .....	53
Tablica 8.5. Treća iteracija – Vrijednosti koeficijenta prijelaza topline.....	54
Tablica 8.6. Treća iteracija – Odstupanja $t_{8/5}$ za varijabilni koeficijent $\alpha$ .....	55
Tablica 8.7. Odstupanja $t_{8/5}$ za uzorke različitih promjera .....	59
Tablica 9.1. Kemijski sastav čelika 42 Cr Mo 4 [6].....	63
Tablica 9.2. Eksperimentalno određena tvrdoća za Ø90 iz 42CrMo4 [6].....	65
Tablica 9.3. Parametri numeričke analize za model Ø90x200 iz 42CrMo4 .....	66
Tablica 9.4. Raspodjela $t_{8/5}$ po čvorovima za Ø90 iz 42CrMo4.....	69
Tablica 9.5. Jominy udaljenost po čvorovima za Ø90 iz 42CrMo4.....	70
Tablica 9.6. Određena tvrdoća po čvorovima za Ø90 iz 42CrMo4 nakon kaljenja.....	71
Tablica 9.7. Usporedba numerički dobivenih i eksperimentalnih tvrdoća.....	72

## 15. SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

Diplomski rad prati razvoj numeričkog modela temeljenog na metodi konačnih elemenata koji omogućuje simulaciju ohlađivanja čeličnog uzorka tijekom kaljenja. Izrađuje se parametarski definiran APDL kod u programskom paketu ANSYS za provođenje toplinske nestacionarne numeričke analize. Zbog nepoznate raspodjele koeficijenta prijelaza topline iterativnim se postupkom kalibriraju krivulje ohlađivanja generirane numeričkim modelom u odnosu na referente krivulje ohlađivanja iz literature. Iz dobivenih se krivulja ohlađivanja u različitim točkama uzorka očitava  $t_{8/5}$  odnosno vrijeme potrebno za ohlađivanje sa 800°C do 500°C. Vrijednost  $t_{8/5}$  koristi se za analitičko određivanje tvrdoće korištenjem Jominy dijagrama. Izrađeni se numerički model verificira usporedbom dobivenih tvrdoća sa eksperimentalno određenim tvrdoćama za isti uzorak.

KLJUČNE RIJEČI: simulacija gašenja, metoda konačnih elemenata, tvrdoća nakon kaljenja, ANSYS, kaljenje

## 16. SUMMARY AND KEY WORDS

This thesis follows the development of a finite element method based numerical model allowing simulation of steel sample cooling during quenching. A parameter defined APDL code is developed in the ANSYS software for the purpose of carrying out transient thermal numerical analysis. Due to the unknown distribution of the heat transfer coefficient, cooling curves generated by the numerical model are calibrated iteratively according to reference cooling curves from the literature. From generated cooling curves  $t_{8/5}$  is defined for various sample points representing time required for cooling from 800°C to 500°C. The value of  $t_{8/5}$  is used for the analytical determination of hardness using Jominy diagram. The developed numerical model is verified by comparing the obtained hardness values with experimentally determined hardness values of the same sample.

**KEY WORDS:** quenching simulation, finite element method, post-quenching hardness, ANSYS, quenching



## 17. PRILOG

### ANSYS APDL kod razvijenog modela za uzorak Ø90 iz 42CrMo4.

```
/PREP7
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_THERM,1
/GO
ET,1,PLANE55
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,KXX,1,,46
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,C,1,,460
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,7850
W = 0.09
L = 0.2
K,1,0,0,0,
K,2,W,0,0
K,3,W,L,0
K,4,0,L,0,
L,2,1
L,2,3
L,3,4
L,4,1
AL,1,2,3,4
AESIZE,1,0.0015
MSHKEY,1
AMESH,1
FINISH
/SOL
ANTYPE,4
DELTIM,1,1,1
```

OUTRES,ERASE  
OUTRES,ALL,ALL

LNSRCH,1  
NEQIT,100  
TIME,150

\*DIM, table1, TABLE, 8, , , TEMP

\*TAXIS, table1(1), 1, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800  
table1(1) = 1200, 1550, 2000, 2220, 2500, 2150, 1950, 1450

SFL, ALL, CONV, %table1%, %table1%, 20, , ,

IC, ALL, TEMP, 800,

/STATUS, SOLU

SOLVE