

# Ispitivanje prokaljivosti visokolegiranih alatnih čelika modificiranim Jominy pokusom

---

Prezelj, Matej Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:075624>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-03**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Matej Ivan Prezelj**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**Ispitivanje prokaljivosti  
visokolegiranih alatnih čelika  
modificiranim Jominy pokusom**

Mentor:

Izv. Prof. dr. sc. Darko Landek,

Student:

Matej Ivan Prezelj

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se laborantu Željku Kostanjskom, kolegi Antoniu Petraku i mentoru Darku Landeku na svojoj pruženoj pomoći.

Matej Ivan Prezelj



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Matej-Ivan Prezelj** Mat. br.: 0035200619

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ispitivanje prokaljivosti visokolegiranih alatnih čelika modificiranim Jominy pokusom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Determination of hardenability of high alloyed tool steels with modified Jominy test**

Opis zadatka:

Visokolegirani alatni čelici uobičajeno su zakaljivi na zraku, a njihova toplinska obrada se provodi u vakuumskim pećima. Ohlađivanje u struji stlačenog plina u vakuumskim pećima može se provesti samo do određenih brzina ohlađivanja, koje u slučaju masivnih alata mogu biti manje od gornje kritične brzine gašenja kaljenog čelika što dovodi do nepotpune prokaljenosti alata. Normom propisano ispitivanje prokaljivosti Jominy metodom nije prikladno za ispitivanje visokolegiranih alatnih čelika jer izaziva potpuno prokaljenje duž cijele ispitne epruvete. Stoga se u literaturi predlažu različite modifikacije Jominy metode prilagođene za određivanje prokaljivosti visoko legiranih čelika.

U teorijskom dijelu rada treba opisati metode ispitivanja prokaljivosti srednje i visokolegiranih alatnih čelika primjenom modificirane Jominy metode te metoda s usporenim ohlađivanjem uzorka u napravi. Na temelju opisanih metoda provesti dimenzionalnu analizu pokusa čeonog gašenja nastrujavanjem stlačenog zraka i definirati odgovarajuće kriterije sličnosti.

U eksperimentalnom dijelu rada treba planirati i provesti ispitivanje prokaljivosti alatnog čelika DIN X155CrVMo12-1 modificiranom Jominy metodom uz variranje uvjeta ohlađivanja prema zadanim kriterijima sličnosti. Na kaljenim uzorcima ispitati krivulje prokaljivosti, odrediti utjecaj uvjeta ohlađivanja na zakaljivost i prokaljivost čelika te predložiti uvjete ohlađivanja koji će ostvariti najveću razliku brzine ohlađivanja po visini ispitnog uzorka.

U radu treba navesti korištenu literaturu i dobivenu stručnu pomoć.

Zadatak zadan:

30. studenog 2017.

Rok predaje rada:

1. rok: 23. veljače 2018.

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.

3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.

2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.

3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Darko Landek

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

**SADRŽAJ**

POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY .....	VI
1. UVOD.....	1
2. METODE ISPITIVANJA PROKALJIVOSTI ALATNIH ČELIKA.....	2
2.1. Ispitivanje prokaljivosti Jominy metodom.....	3
2.2. Ispitivanje prokaljivosti prema metodi Timken .....	5
2.3. Ispitivanje prokaljivosti metodom Nori .....	6
2.4. Ispitivanje prokaljivosti pokusom čeonog gašenja nastrujavanjem stlačenog zraka ...	9
3. DIMENZIONALNA ANALIZA POKUSA ČEONOG GAŠENJA .....	11
3.1. Uvod u dimenzijsku analizu i teoriju sličnosti.....	11
3.2. Određivanje kriterija sličnosti .....	13
3.3. Utjecajne veličine na pokus čeonog gašenja u struji stlačenog plina.....	14
3.3.1. Utjecaj oblika, dimenzija i mase uzorka .....	15
3.3.2. Utjecaj materijala uzorka .....	17
3.3.3. Utjecaj konstrukcije komore i šaržiranja .....	18
3.3.4. Utjecaj vrste i parametara plina za gašenje.....	19
3.4. Model proračuna koeficijenta prijelaza topline .....	25
4. PLAN I PROVEDBA EKSPERIMENTA .....	28
5. REZULTATI ISPITIVANJA I ANALIZA REZULTATA.....	39
5.1. Pokus čeonog gašenja nastrujavanjem stlačenog plina.....	44
5.2. Proračun koeficijenta prijelaza topline .....	46
5.3. Diskusija rezultata ispitivanja prokaljivosti .....	48
6. ZAKLJUČAK.....	49

## POPIS SLIKA

Slika 2.1.	Shema uređaja za provedbu Jominy eksperimenta [1].....	3
Slika 2.2.	Krivulje prokaljivosti za različite vrste čelika A, B i C [1].....	4
Slika 2.3.	Aparatura za ispitivanje prokaljivosti po metodi Timken [2] .....	5
Slika 2.4.	Naprava za pokus čeonog gašenja pri ispitivanju prokaljivosti alatnih čelika metodom Nori [2].....	6
Slika 2.5.	Ovisnost vremena hlađenja o udaljenosti od gašenog čela [2].....	7
Slika 2.6.	Vakuumsko postrojenje za ispitivanje prokaljivosti u struji stlačenog plina [3] ..	10
Slika 3.1	Utjecaj promjera uzorka na ohlađivanje [5] .....	15
Slika 3.2	Utjecaj koeficijenta prijelaza topline na brzinu ohlađivanja [6] .....	16
Slika 3.3	TTT dijagrami za nelegirani (lijevo) i legirani čelik (desno) [1] .....	17
Slika 3.4	Utjecaj šaržiranja na vrijednosti koeficijenta prijelaza topline [6].....	18
Slika 3.5	Utjecaj vrste nastrojavanja na vrijednosti koeficijenta prijelaza topline [6] .....	19
Slika 3.6	Utjecaj vrste plina na vrijeme ohlađivanja [6] .....	20
Slika 3.7	Utjecaj tlaka na brzinu ohlađivanja [6] .....	22
Slika 3.8	Utjecaj brzine strujanja na brzinu ohlađivanja [6] .....	23
Slika 3.9	Utjecaj temperature plina na brzinu ohlađivanja [6] .....	24
Slika 3.10	Zona nastrojavanja u slučaju jedne mlaznice [8] .....	26
Slika 4.1	Pseudobinarni dijagram stanja Fe-Cr-C [9].....	28
Slika 4.2	Kontinuirani TTT dijagram X155CrVMo12-1 čelika [9] .....	29
Slika 4.3	Dijagram postupka toplinske obrade X155CrVMo12-1 – hlađenje u granulatu ...	30
Slika 4.4	Toplinska izolacija epruvete granulatom za pougljičavanje: a) prije ugrijavanja, b) nakon ohlađivanja.....	31
Slika 4.5	Električna peć za toplinsku obradu ohlađivanjem u granulatu.....	32
Slika 4.6	Dijagram postupka toplinske obrade X155CrVMo12-1 – hlađenje u toplinskoj izolaciji .....	33
Slika 4.7	Peć za toplinsku obradu u zaštitnoj atmosferi argona .....	34
Slika 4.8	Ispitni uzorak na povišenom podiju unutar peći za toplinsku obradu .....	34
Slika 4.9	Ispitni uzorak ohlađen u izolaciji od aluminijsko silikatne izolacijske vune .....	35
Slika 4.10	Tvrdomjer za ispitivanje po metodi Rockwell C.....	36
Slika 4.11	Izbrušene epruvete.....	36
Slika 4.12	Označene epruvete .....	37
Slika 4.13	Ispitivane epruvete .....	38
Slika 5.1	Krivulja hlađenja čela ispitnih epruveta u granulatu i izolacijskoj vuni .....	39
Slika 5.2	Krivulja prokaljivosti epruveta 1 i 4 ohlađenih s temperature 1020°C u granulatu .....	41
Slika 5.4	Krivulja prokaljivosti epruveta 2 i 3 ohlađenih s temperature 1020°C u izolacijskoj vuni .....	42
Slika 5.6	Aparatura za pokus čeonog gašenja nastrojavanjem stlačenog plina.....	44
Slika 5.7	Krivulje prokaljivosti za epruvetu 1 [ $\theta_a=950^\circ\text{C}$ ].....	45
Slika 5.8	Krivulje prokaljivosti za epruvetu 2 [ $\theta_a=850^\circ\text{C}$ ].....	45

## **POPIS TABLICA**

Tablica 4.1 Režim ugrijavanja na temperaturu austenitizacije .....	30
Tablica 4.2 Režim ugrijavanja na temperaturu austenitizacije .....	32
Tablica 5.1 Toplinska svojstva dušika pri tlaku 1 bar .....	46



**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$t$	s	Vrijeme ispitivanja
HRC	-	Tvrdoća prema Rockwell-u
$\alpha$	W/(m <sup>2</sup> K)	Koeficijent prijelaza topline
$c_p$	kJ/(kg K)	Specifični toplinski kapacitet
$\phi$	mm	Promjer uzorka
$p$	bar	tlak
$v$	m/s	Brzina plina
$v_{hl}$	°C/s	Brzina ohlađivanja
$\theta$	°C	Temperatura
$d$	-	Karakteristična dimenzija
$\eta$	Pa s	Dinamička viskoznost
$\lambda$	W/(m K)	Koeficijent provođenja topline
$C$	-	Konstanta ovisna o konstrukciji komore i šarži
$D$	mm	Promjer sapnice
$H$	mm	Udaljenost sapnice i gašenog čela
$r$	mm	Polumjer uzorka
$Nu$	-	Nusseltov broj
$Re$	-	Reynoldsov broj
$Pr$	-	Prandtlov broj
$Pe$	-	Pecletov broj
$Gr$	-	Grashofov broj
$X$	mm	Udaljenost od čela epruvete

## **SAŽETAK**

U ovom radu proučene su metode ispitivanja prokaljivosti alatnih čelika. Nove metode ispitivanja uvode se zbog nedovoljne selektivnosti konvencionalnih metoda poput Jominy testa. Na temelju opisanih metoda u usporedbi sa Jominy metodom provedena je i dimenzionalna analiza pokusa čeonog gašenja nastrujavanjem stlačenog plina te su definirani odgovarajući kriteriji sličnosti. Eksperimentalni dio ispitivanja proveden je na ispitnim epruvetama visoko legiranog čelika X155CrVMo12-1 s variranjem parametara gašenja. Nakon ispitivanja kreirane su krivulje prokaljivosti te je određen utjecaj uvjeta ohlađivanja na zakaljivost i prokaljivost čelika. Na temelju rezultata predloženi su optimalni uvjeti ohlađivanja.

Ključne riječi: prokaljivost, čeono gašenje, visoko legirani čelik

## **SUMMARY**

In this undergraduate thesis a number of methods for hardenability determination was considered. New methods of analysis are introduced due to the poor selectiveness of conventional means such as the Jominy test. Based on the procedures compared with the standard Jominy test, dimensional analysis of the high pressure gas quenching experiment was conducted in the thesis and corresponding criteria of similarity were defined. The experimental part of this thesis was conducted on test samples of high alloyed X155CrVMo12-1 steel with varying cooling parameters. After careful examination of samples, hardenability curves were formed and the influence of cooling on the steel hardenability was determined. Based on the results, optimal conditions of cooling were chosen.

Key words: hardenability, end-quench experiment, high alloyed steel

# TEORIJSKI DIO

## **1. UVOD**

U teorijskom dijelu rada razmatraju se modificirane metode ispitivanja prokaljivosti srednje i visokolegiranih alatnih čelika. Takvi čelici su iznimno dobro prokaljivi ponajprije zbog visokog udjela legiranih elemenata. Naime, legirni elementi osiguravaju neznatan pad tvrdoće po presjeku gašenog uzorka. Kako bi se postigao određeni pad tvrdoće radi povišenja selektivnosti metode potrebno je sniziti intenzitet gašenja i dimenzije epruvete. Promjer epruvete se smanjuje sa 25 mm na 20 mm dok duljina ostaje ista standardnoj epruveti. Na intenzitet gašenja utječe se primarno promjenom brzine ohlađivanja na vrijednosti manje od 10 K/s. Time se postižu uvjeti gašenja analogni uvjetima gašenja realnih alata. Modifikacije standardizirane Jominy metode uključuju: Timken Bearing Company Air Test, metodu po Noriju te pokus čeonog gašenja u struji stlačenog plina.

U radu je provedena i dimenzionalna analiza pokusa čeonog gašenja nastrujavanjem stlačenog zraka u svrhu definiranja kriterija sličnosti pomoću utjecajnih faktora eksperimenta poput materijala uzorka, konstrukcije komore i parametara gašenja koji imaju određen utjecaj na izračun koeficijenta prijelaza topline.

Eksperimentalni dio rada uključuje toplinsku obradu četiri epruvete te njihovo hlađenje u različitim uvjetima. Na epruvetama je potom ispitana temperatura gašenog čela u vremenu te tvrdoća po izvodnici. Također su napravljene usporedbe s ranijim ispitivanjima u području pokusa čeonog gašenja.

## 2. METODE ISPITIVANJA PROKALJIVOSTI ALATNIH ČELIKA

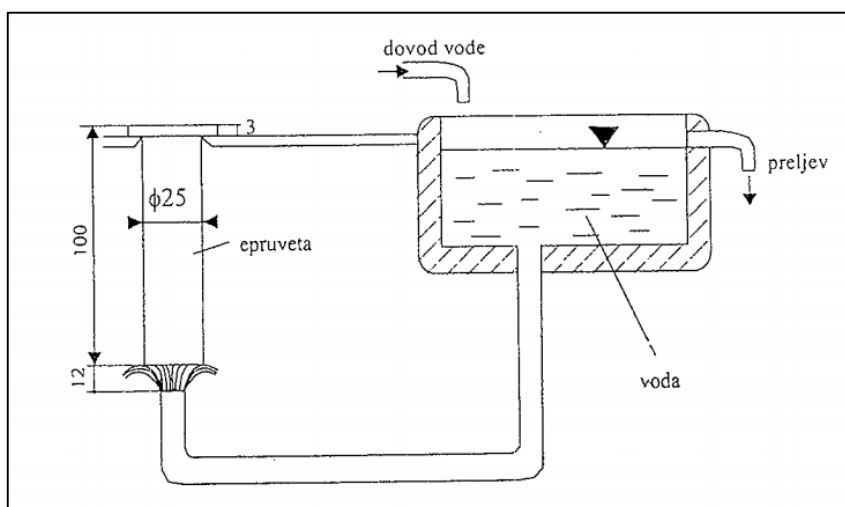
Temeljna svrha kaljenja čelika je postizanje što uniformnijeg prokaljenja (jednolična tvrdoća po presjeku) i što više tvrdoće.

Prokaljivost je, shodno tome, svojstvo čelika da poprimi najveću moguću tvrdoću po presjeku. Ovisi o veličini austenitnog zrna i kemijskom sastavu, a samim time i o udjelu legiranih elemenata koji olakšavaju austenitnu pretvorbu što se očituje u duljem trajanju inkubacije i transformacije. Time je TTT dijagram potisnut u desno, u period većeg vremenskog trajanja.

Prokaljivost se eksperimentalno određuje pokusima kaljenja cilindričnih uzoraka različitih promjera i primjenom različitih medija i intenziteta gašenja. Prerezivanjem kaljenih uzoraka dobivaju se poprečni presjeci na kojima se ispituje tvrdoća. Raspored izmjerenih rezultata tvrdoće po presjeku unosi se u dijagrame toka tvrdoće iz kojih se očitava da je tvrdoća na rubu najviša te postupno opada smanjenjem promjera. U većini slučajeva kao uvjet prokaljivosti uzima se tzv. „kritična tvrdoća“. To je ona tvrdoća pri kojoj se postigla 50% martenzitna mikrostruktura. Promjer pri kojem se postiglo 50% martenzita još se naziva „kritični promjer“. Takvo ispitivanje zahtijeva velik broj uzoraka koji se često ne može ostvariti pa se u upotrebu uvodi normirana i univerzalno prihvaćena Jominy metoda. Poradi nedovoljne selektivnosti metode uvode se i modificirane metode obrađene u nastavku.

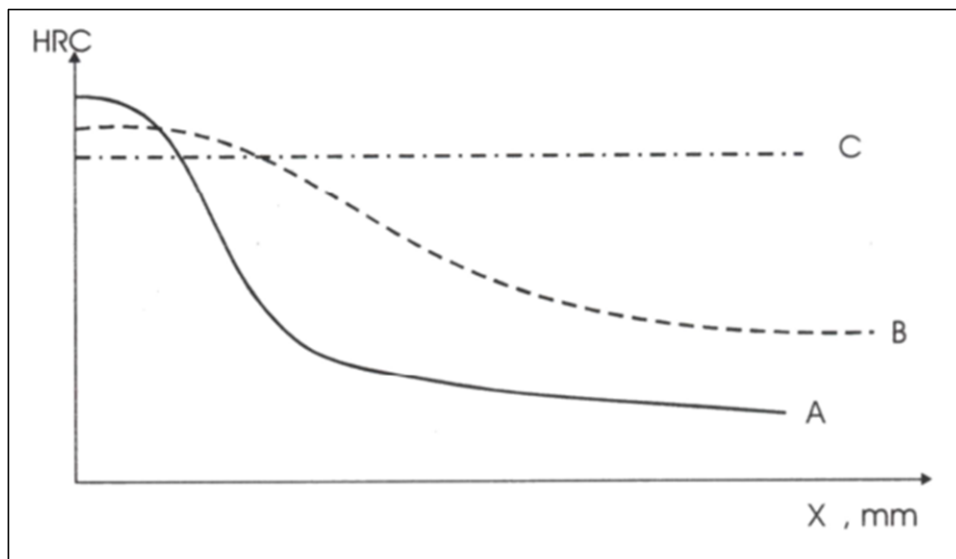
## 2.1. Ispitivanje prokaljivosti Jominy metodom

Metoda se zasniva na ispitivanju samo jednog ispitnog uzorka. Uzorak je propisanog oblika i dimenzija te mu se tokom ispitivanja intenzivno, s temperature austenitizacije, gasi čelo. Ispitivanje se provodi u za to predviđenom uređaju jednostavne konstrukcije. Na uzorku se postižu različite brzine ohlađivanja pri kojima se javljaju različite mikrostrukture i tvrdoće ispitivanog čelika.



Slika 2.1. Shema uređaja za provedbu Jominy eksperimenta [1]

Iz dobivenih vrijednosti formira se tzv. „Jominy-krivulja“ koja reprezentira tok tvrdoće u ovisnosti o udaljenosti od gašenog čela uzorka. Budući da je brzina ohlađivanja upravo najveća na čelu epruvete tamo se postiže 100% martenzitna mikrostruktura s maksimalnom tvrdoćom. Kako se udaljenost od čela povećava pada udio martenzita u mikrostrukturi uz pojavu zaostalog austenita čime se tvrdoća postupno smanjuje.



Slika 2.2. Krivulje prokaljivosti za različite vrste čelika A, B i C [1]

Iznad su prikazane tri krivulje prokaljivosti u dijagramu ovisnosti tvrdoće o udaljenosti od gašenog čela pri čemu je čelik C najviše prokaljiv, čelik B je znatno niže prokaljivosti, dok je čelik A najmanje prokaljiv.

Iako se za potrebe određivanja tvrdoće i mikrostrukture poglavito koriste kontinuirani TTT dijagrami, isti nisu uvijek prikladni zbog činjenice da su konstruirani za posebnu šaržu čelika koja nužno ne mora biti istog kemijskog sastava kao i ispitivani čelik. Zbog toga se, za preciznije određivanje tih dviju značajki koriste Jominy krivulje čelika, no smanjena je pouzdanost utvrđivanja vrste i udjela mikrostrukturnih faza.

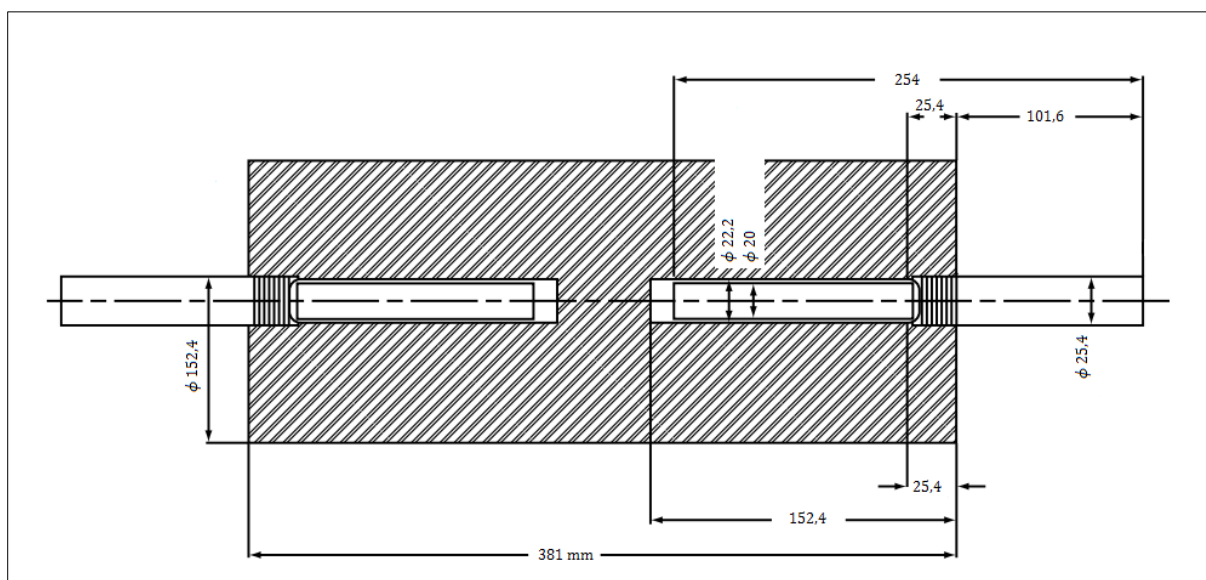
Postizivo vrijeme hlađenja pri izvedbi Jominy testa iznosi oko 200 sekundi, no iz literature je poznato da je vrijeme hlađenja, za alatne čelike, u kojem dolazi do martenzitne transformacije od 200 s do 1000 s. Dakle, ispitivanje po Jominy testu neće biti dovoljno selektivno ukoliko se provode testovi prokaljivosti srednje i visokolegiranih čelika. Shodno tome razvijene su modificirane metode ispitivanja prokaljivosti sa nižim brzinama ohlađivanja.



## 2.2. Ispitivanje prokaljivosti prema metodi Timken

Metoda prema Timkenu tj. Timken Bearing Company Air Test izmijenjena je verzija ispitivanja koju su razvili Post, Fetzer i Fenstermacher. Izrađuju se dva ispitna uzorka s polovično izrađenim navojem određenih dimenzija kao što je prikazano na slici 2.3.

Ispitni uzorci pričvršćeni su vijčanim spojem u valjak promjera 152,4 mm, duljine 381 mm, pri čemu je za hlađenje priložena duljina ispitnog uzorka 101,6 mm. Cijela naprava se ugrijava 4 sata na temperaturu austenitizacije nakon čega se ispitni uzorak hladi na mirnom zraku. Masivna cilindrična naprava koči hlađenje izloženih dijelova uzoraka, proizvedeci tako različite uvjete hlađenja uzduž uzorka. Brzine hlađenja se smanjuju u rasponu od 17,1 do 17,6 °C/s uzduž cijelog uzorka.

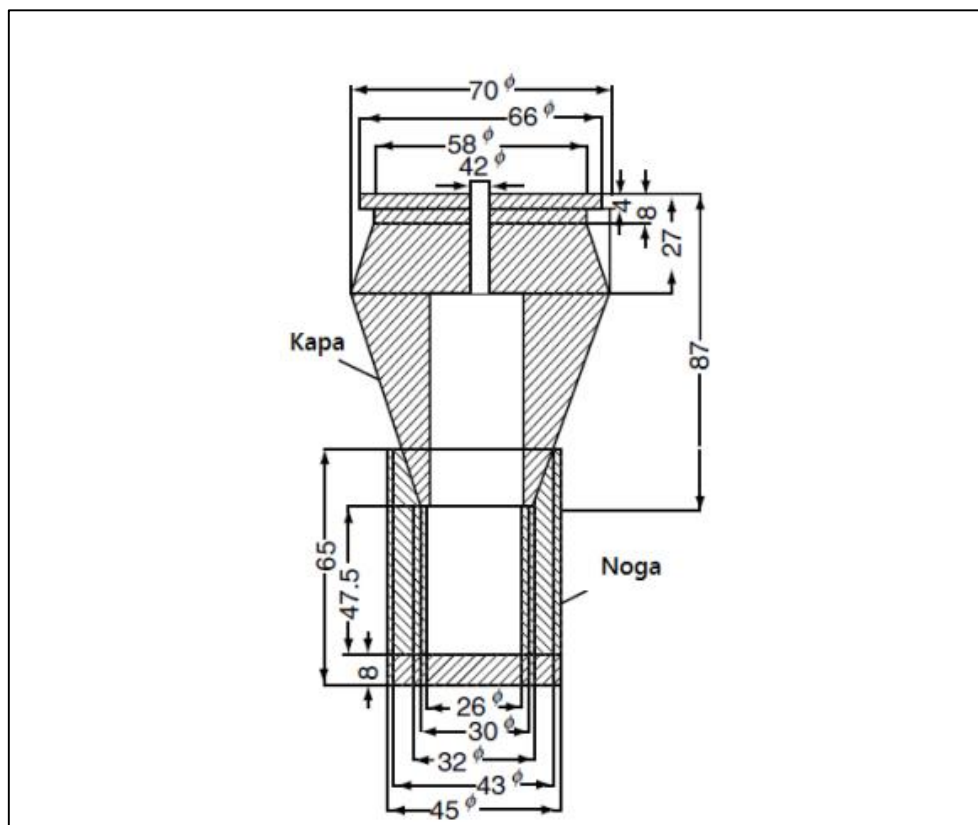


Slika 2.3. Aparatura za ispitivanje prokaljivosti po metodi Timken [2]

Krivulje tvrdoće za alatne čelike za topli rad i visoko-temperатурne konstrukcijske čelike prikazane su na slici 2.3 zajedno sa stvarnim brzinama hlađenja na različitim udaljenostima od čela ispitnog uzorka. Znatne razlike u tvrdoći ovih čelika primjenom Timken metode nisu vidljive pri uporabi standardiziranog Jominy testa.

### 2.3. Ispitivanje prokaljivosti metodom Nori

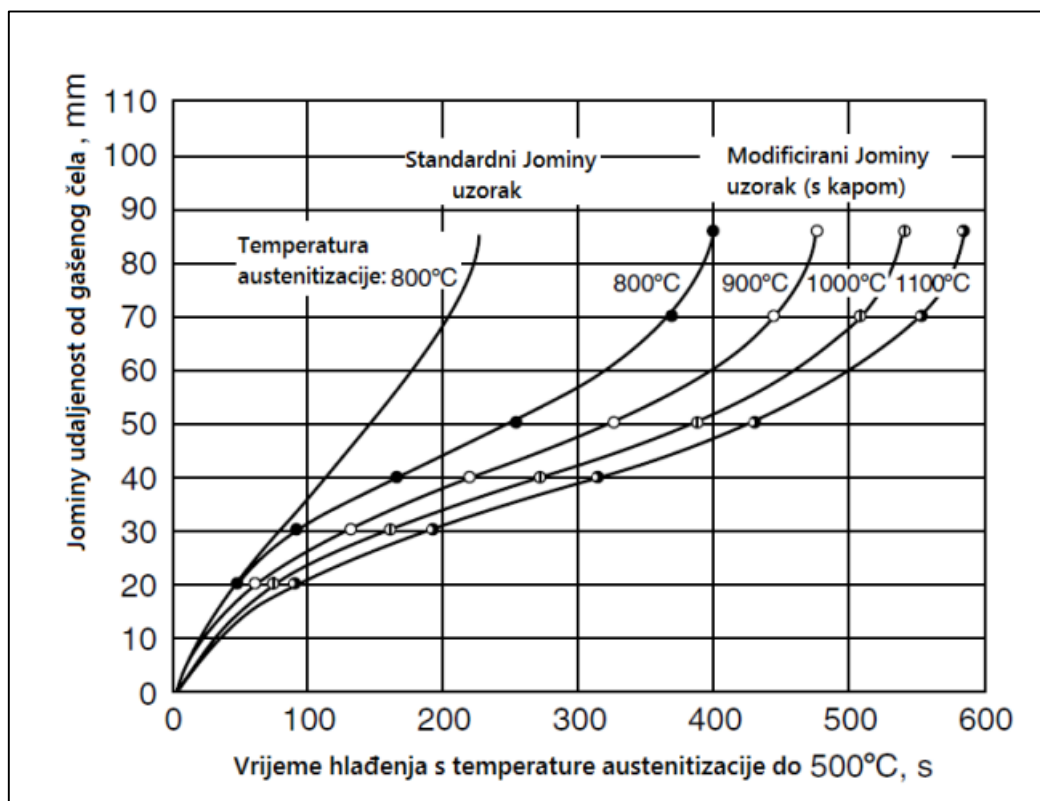
Kako bi se omogućila primjena Jominy ispitivanja za čelike zakaljive na zraku u ispitivanju metodom Nori potrebno je povećanje mase gornjeg dijela epruvete korištenjem specijalne kape od nehrđajućeg čelika. Na taj način, brzine hlađenja gornjeg dijela uzorka smanjene su ispod kritične brzine hlađenja ispitivanog čelika.



**Slika 2.4. Naprava za pokus čeonog gašenja pri ispitivanju prokaljivosti alatnih čelika metodom Nori [2]**

Uređaj za ispitivanje sastoji se od naprave sa stožastom kapom s rupom u koju se umeće uzorak i noga. Noga se postavlja na donji kraj uzorka tijekom procesa austenitizacije u svrhu izjednačavanja temperature austenitizacije duž cijelog uzorka. Vrijeme zagrijavanja iznosi 40 minuta uz ukupno 20 minuta držanja na temperaturi austenitne pretvorbe. Prije provedbe kaljenja epruvete i kape prema standardnoj Jominy metodi potrebno je ukloniti nogu naprave.

Na slici su prikazane krivulje brzina kod gašenja konvencionalnog i modificiranog Jominy uzorka. Dijagram prikazuje ovisnost vremena hlađenja, s temperature austenitizacije do temperature od 500°C, o udaljenosti od gašenog čela epruvete za različite temperature austenitne pretvorbe.



Slika 2.5. Ovisnost vremena hlađenja o udaljenosti od gašenog čela [2]

Na slici je vidljivo da pri temperaturi austenitizacije 800°C do udaljenosti od približno 20 mm od gašenog čela, krivulje hlađenja za standardni i modificirani uzorak se gotovo poklapaju sa tek neznatnim odstupanjima, no imaju jednake brzine hlađenja. Na većim udaljenostima sve su sporije brzine hlađenja u odnosu na standardni uzorak. Primjenom kape brzine hlađenja su dvostruko niže tj. gledano vremenski vrijeme hlađenja je dvostruke vrijednosti.

U daljnjim koracima metode također se konstruiraju dvije Jominy krivulje prokaljivosti za modificirani i standardni uzorak od alatnog čelika 45CrMoV67. Analogno prethodnom dijagramu, do 20 milimetara udaljenosti od gašenog čela krivulje se praktički poklapaju, no povećanjem te udaljenosti, utjecaj sporijeg hlađenja modificirane epruvete na tvrdoću sve je veći što konačno dovodi do sniženja tvrdoće.

Jedna od većih prednosti ove metode može se vidjeti ako se standardni uzorak kali na temperaturi koja će rezultirati sekundarnim očvrnućem. U tom slučaju nakon popuštanja na 300°C i 500°C tvrdoća se kontinuirano smanjuje povećanjem udaljenosti od čela, no kod većih udaljenosti zbog efekta očvrnuća tvrdoća raste za oko 4 HRC.

#### **2.4. Ispitivanje prokaljivosti pokusom čeonog gašenja nastrujavanjem stlačenog zraka**

Nadkritično hlađenje uzoraka u u struji stlačenog zraka u vakuumskim pećima postavlja niz prednosti nad ostalim metodama hlađenja. Najbolji primjer toga su uniformnost tvrdoće po cijelom presjeku obradka, manji udio nepravilnosti, mogućnosti automatizacije procesa i regulacije dinamike gašenja. Na predviđanje tvrdoće utječu sljedeći faktori:

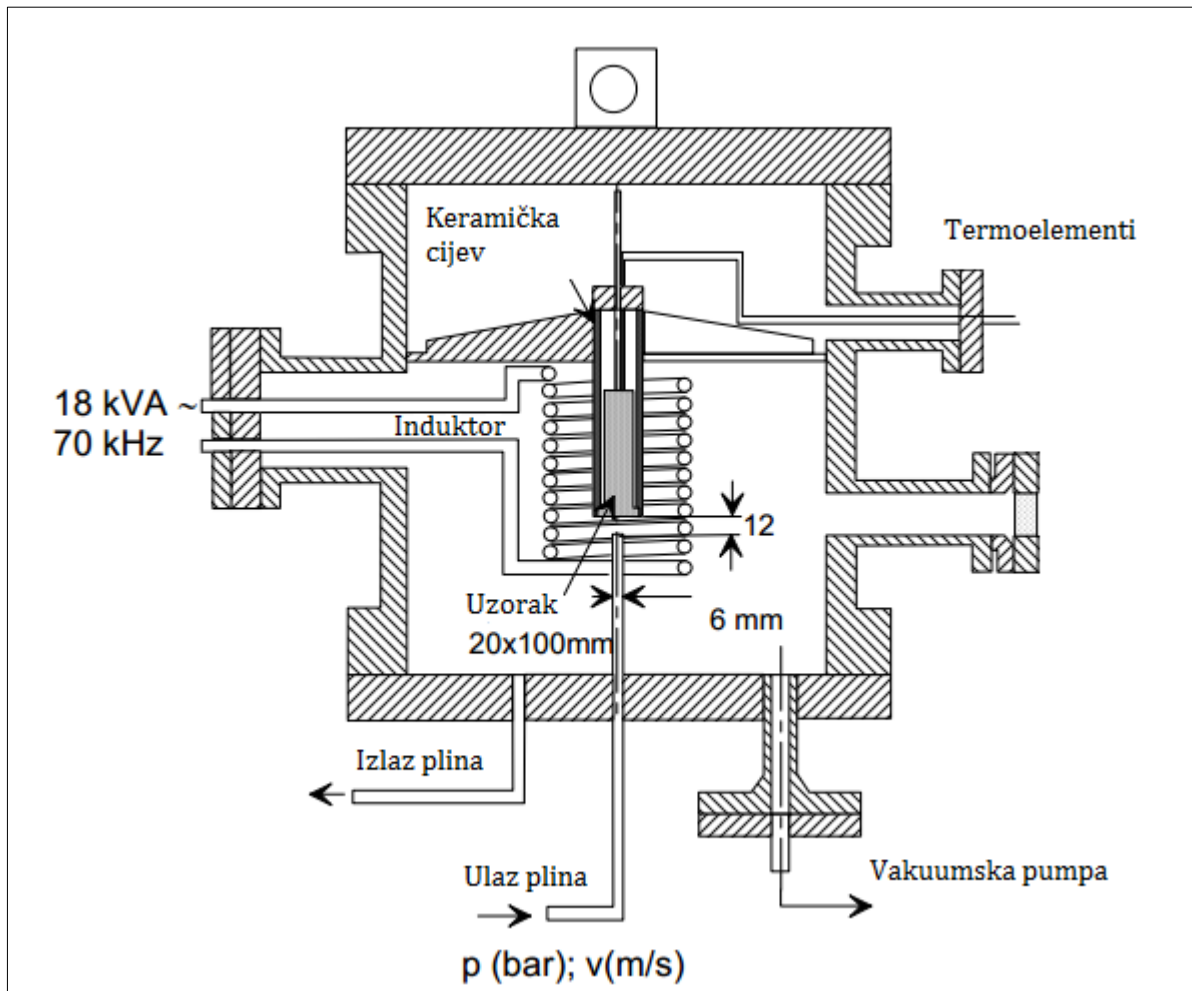
- parametri gašenja
- šaržiranje
- masa, dimenzije i oblik obradka
- prokaljivost čelika
- karakteristika vakuumske peći

Primjenom metode srednje i visoko legirani čelici gase se pri različitim brzinama strujanja i različitim tlakovima plina. Budući da je cilj postići veću selektivnost metode tj. postepeniji pad tvrdoće po presjeku, gašenje je blažeg intenziteta nego ono korištenjem drugih vrsta medija poput ulja i vode. Nedostatak ovoj metodi je nedostatak podataka o prokaljivosti različitih vrsta čelika kaljenih u struji plina.

Da bi se postigao manji intenzitet gašenja potrebno je izmijeniti masu uzroka smanjenjem dimenzija pa se promjer epruvete smanjuje za 5 milimetara, dok duljina ostaje 100 milimetara. Gornji dio uzorka nalazi se u toplinski izoliranoj keramičkoj cijevi, dok se donji dio intenzivno gasi.

Iz ranijih teoretskih razmatranja o strujanju plina pod visokim pritiskom i značajkama prijenosa topline pokazano je da tlak i brzina plina imaju najveći utjecaj na intenzivnost ohlađivanja. Najniži intenzitet gašenja, primarno zbog veće gustoće, ima dušik, dok helij i vodik sa puno manjim gustoćama imaju više intenzitete gašenja. Variranje tih dvaju svojstava postižu se kraća i duža vremena hlađenja ovisno o kombinaciji.

Prokaljivost se ispituje na modificiranoj Jominy epruveti u specijalnom uređaju s vakuumskom komorom. Komora je opremljena setom indukcijskih grijača, termoelementima, vakuumskim pumpama i te otvorima za usis i odsis plina kao što je prikazano na slici 2.6.



Slika 2.6. Vakuumsko postrojenje za ispitivanje prokaljivosti u struji stlačenog plina [3]

### 3. DIMENZIONALNA ANALIZA POKUSA ČEONOG GAŠENJA

#### 3.1. Uvod u dimenzijsku analizu i teoriju sličnosti

Dimenzijska analiza i teorija sličnosti temelj su eksperimentalnog istraživanja kompleksnih fizikalnih pojava u raznim područjima fizike. Kako je opisano u [4] uporabom dimenzijske analize pretpostavlja se skup utjecajnih veličina na neki proces, formira se podloga za organiziranje eksperimenta minimiziranjem potrebnog broja mjerenja, a time se olakšava prikaz i analiza rezultata. Postupak se temelji na činjenici da se svaka dimenzija tj. jedinica svake fizikalne veličine može izraziti kao produkt potencija osnovnih dimenzija. Primjerice, u kinematici fluida moguće je dimenzije fizikalnih veličina prikazati pomoću sljedeće dvije dimenzije: duljina i vrijeme. U slučaju stlačivog strujanja fluida potrebne su četiri dimenzije: duljina, vrijeme, masa i temperatura. U analizi su prisutna dva pravila: teorem o dimenzijski nezavisnom skupu i Buckinghamov teorem. Prvi se odnosi na ograničenje da se dimenzija niti jedne fizikalne veličine nekog određenog skupa ne može prikazati dimenzijama ostalih veličina tog skupa. Buckinghamov teorem nalaže da ako postoji dimenzijski homogena jednačba sastavljena od  $n$  fizikalnih veličina, ista se može izraziti pomoću  $n-k$  bezdimenzijskih varijabli tj. Pi parametara.

Teorija sličnosti daje podlogu za modelska istraživanja korištenjem seta jednačbi koje opisuju neku pojavu. Takva istraživanja koriste se samo onda ako postoji određena povezanost između rezultata na modelu i rezultata na prototipu. U osnovnom slučaju, fizikalne pojave su slične ako se mogu opisati istim fizikalnim zakonima te ako se veličine u jednoj pojavi (prototip) mogu odrediti iz veličina druge pojave (model). Tome služi tzv. koeficijent (kriterij) sličnosti. Do kriterija sličnosti dolazi se svođenjem sustava jednačbi, kojima se opisuju neka pojava, te početnih i rubnih uvjeta u bezdimenzijski oblik. Ako se uzme u obzir da setovi jednačbi za model i prototip imaju isto bezdimenzijsko rješenje mora vrijediti da su i koeficijenti tih jednačbi isti za obadvije pojave. Iz tog uvjeta jednakosti koeficijenata dobiva se kriterij sličnosti. Neki od važnijih kriterija sličnosti su Strouhalov, Froudeov, Eulerov, kavitacijski, Machov i Reynoldsov broj.

Jedan od najbitnijih bezdimenzijskih parametara u ovoj jednačbi je Reynoldsov broj koji je od izuzetne važnosti u pokusu čeonog gašenja. Naime, korelacija između vrijednosti

Reynoldsovog broja i utjecaja viskoznosti medija nalaže da pri visokim vrijednostima  $Re$  viskozne sile je moguće zanemariti u većem dijelu područja strujanja. No, u slučaju kada u području strujanja postoji čvrsta površina/stijenka utjecaj viskoznih sila nije zanemariv. Zbog viskoznosti medija brzina fluida na površini je gotovo nepostojeća dok se udaljavanjem od površine ta brzina postupno povećava. Zbog toga će, na površini dijela, postojati područje u kojem je brzina zajedno s inercijskim silama toliko mala da se utjecaj viskoznosti ne može zanemariti. Upravo u takvim slučajevima uvodi se Reynoldsov broj.



### 3.2. Određivanje kriterija sličnosti

Postupak određivanja kriterija sličnosti sastoji se od četiri koraka:

1. Definiranje početnih jednadžbi, rubnih i početnih uvjeta
2. Definiranje karakterističnih vrijednosti za svaku promjenjivu veličinu
3. Zamjena dimenzijskih veličina sa bezdimenzijskima
4. Uvjet jednakosti bezdimenzijskih veličina modelske i prototipne pojave

Dodatno, kriterij sličnosti se može izraziti tako da se u jednadžbama prototipne pojave sve veličine izraze pomoću veličina modelske pojave te se potom traže uvjeti izvođenja tih jednadžbi.

U slučaju modeliranja prijelaza topline u stlačenim plinovima najznačajniji kriteriji sličnosti jesu slijedeći:

$$Nu = \frac{\alpha D}{\lambda} \quad (1)$$

$$Re = \frac{\omega D}{\nu} \quad (2)$$

$$Pr = \frac{\eta c_p}{\lambda} \quad (3)$$

$$Pe = Re \cdot Pr \quad (4)$$

$$Gr = \frac{\rho_0 - \rho_s}{\rho_s} \frac{g l_0^3}{v_s^2} \quad (5)$$

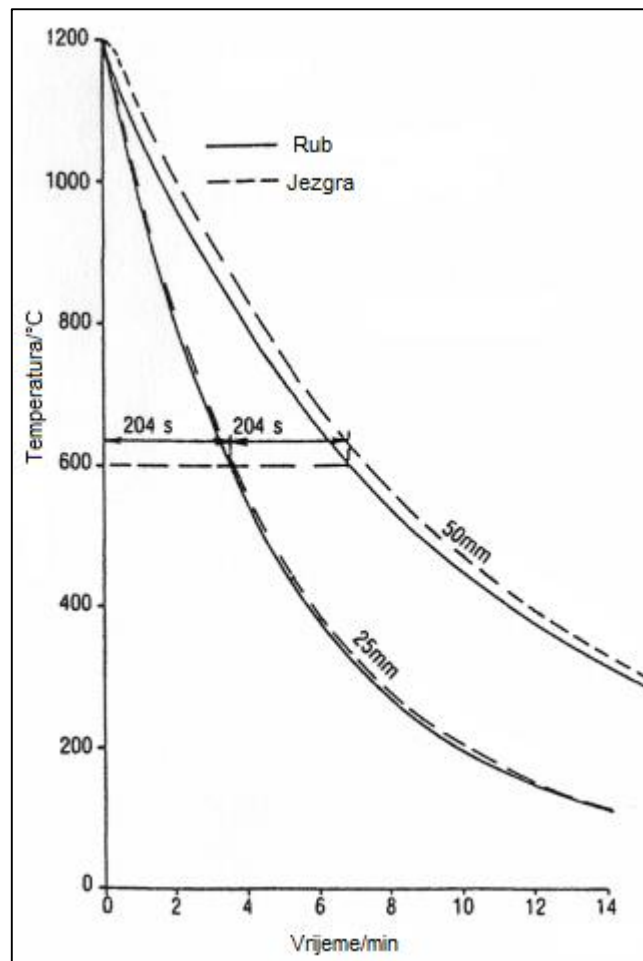
### **3.3. Utjecajne veličine na pokus čeonog gašenja u struji stlačenog plina**

Gašenje u struji stlačenog plina relativno je nov postupak koji nudi brojne prednosti nad konvencionalnim metodama gašenja korištenjem tekućeg medija poput ulja ili solnih kupki. Razlog tome je bolja ponovljivost procesa, eliminacija Leidenfrostovog fenomena i efekta crne kutije s otvaranjem mogućnosti za kontrolu uvjeta (vrsta plina, brzina protoka, tlak) unutar komore. Kako bi se postigli optimalni rezultati potrebno je obratiti pozornost na sljedeće parametre:

- oblik, dimenzije i masa uzorka
- materijal uzorka
- konstrukcija komore i šaržiranje
- vrsta i parametri plina za gašenje

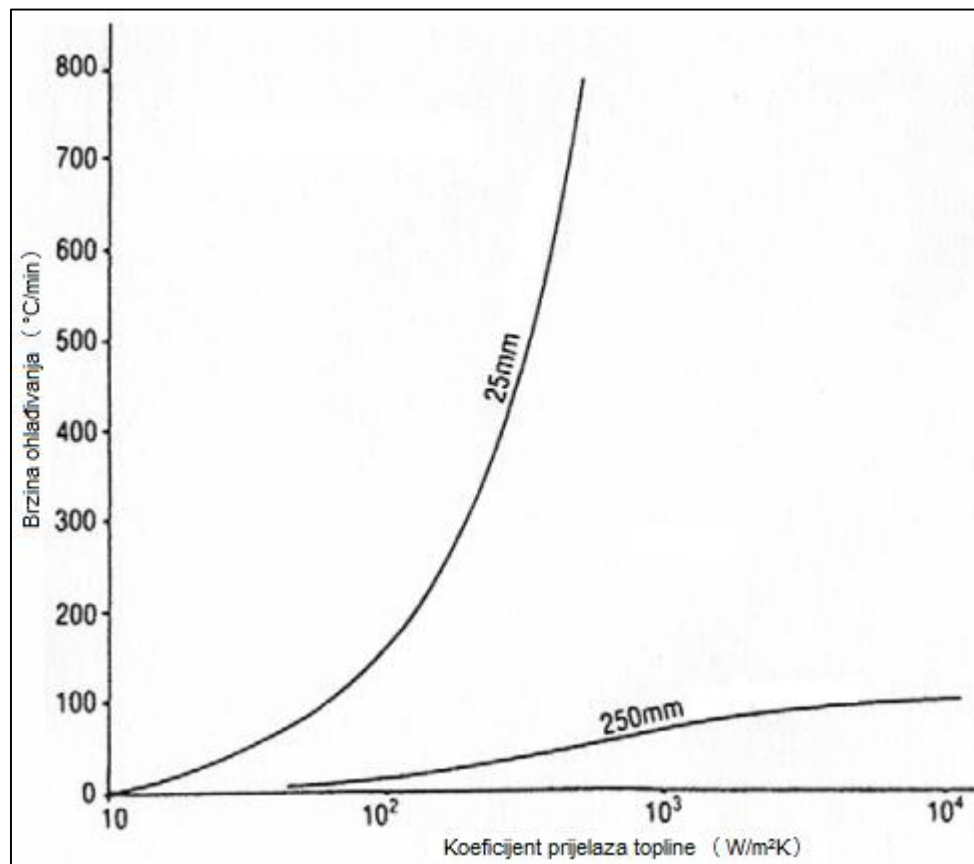
### 3.3.1. Utjecaj oblika, dimenzija i mase uzorka

Veličina uzorka tj. promjer uzorka ima značajan utjecaj na brzinu ohlađivanja. Povećanjem promjere povećava se i masa te se jezgra hladi znatno sporije od površine što dovodi do nedovoljne prokaljenosti dijela. Na slici 3.1 prikazan je utjecaj promjera na ohlađivanje.



Slika 3.1 Utjecaj promjera uzorka na ohlađivanje [5]

Kao što je vidljivo povećanjem promjera dolazi do porasta vremena ohlađivanja. Udvostručavanjem vrijednosti promjera uzrokuje dvostruko manju brzinu ohlađivanja. Na slici 3.2 prikazana je promjenljivost brzine ohlađivanja za određen interval vrijednosti koeficijenta prijelaza topline za dva različita promjera.

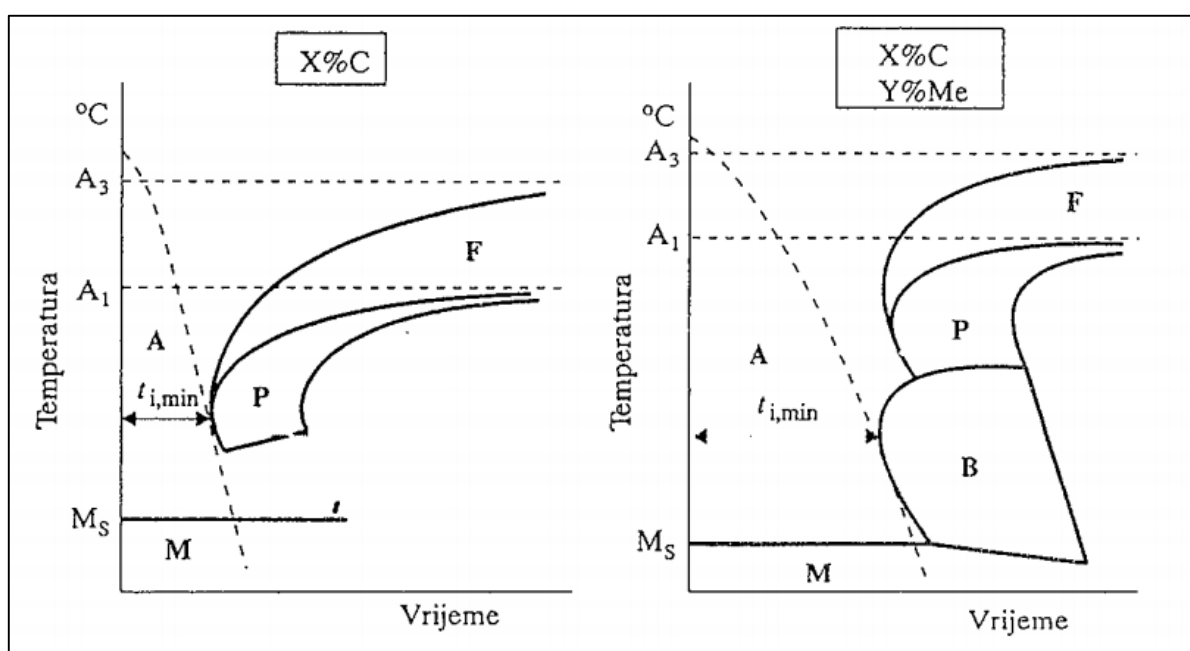


Slika 3.2 Utjecaj koeficijenta prijelaza topline na brzinu ohlađivanja [6]

Brzina ohlađivanja za uzorak promjera 250 mm jedva se zamjetno mijenja povećanjem koeficijenta prijelaza topline, dok je ta promjena za uzorak od 25 mm puno veća.

### 3.3.2. Utjecaj materijala uzorka

Kao što je već navedeno u uvodu, legirani čelici posjeduju veću prokaljivost od nelegiranih. Zavisno o tome kojom su vrstom elemenata legirani, poznajemo alfa-gene legirne elemente i gama-gene. Alfa-genima se proširuje područje feritne faze te je temperatura pretvorbe u austenit viša, a gama-genima temperatura austenitizacije pada.. U TTT dijagramu najbolje se vidi utjecaj legirnih elemenata na brzinu ohlađivanja, samim time i na prokaljivost uzorka. Na sljedećoj slici prikazana su dva TTT dijagrama

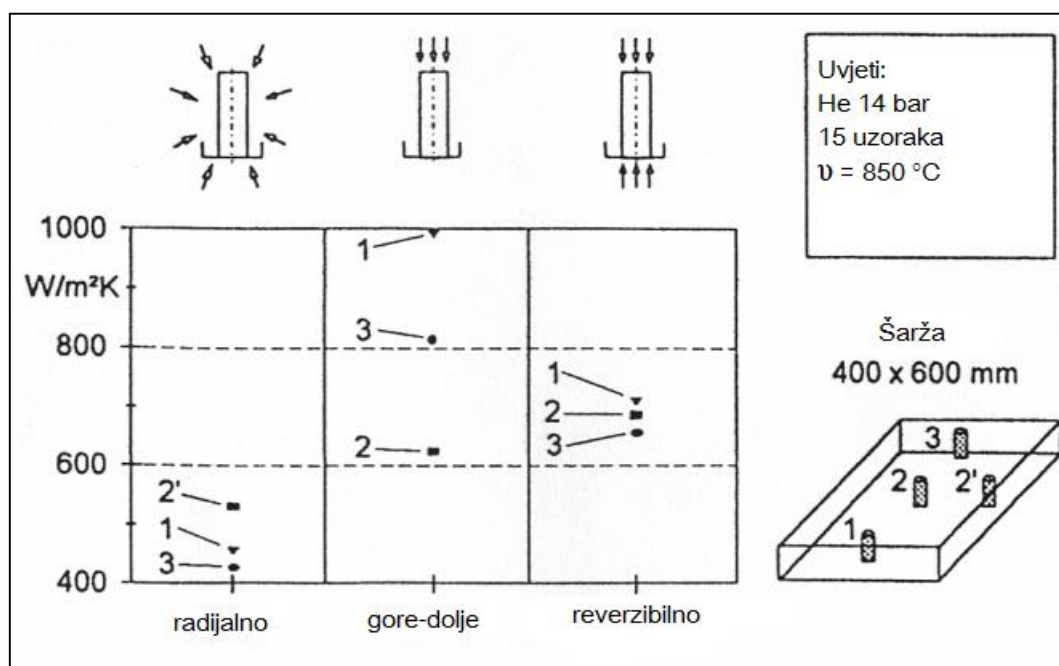


Slika 3.3 TTT dijagrami za nelegirani (lijevo) i legirani čelik (desno) [1]

Za legirani čelik cijeli dijagram pomaknut je udesno, čime se povisuje vrijeme inkubacije, prokaljivost čelika te je prosječna kritična brzina gašenja niža.

### 3.3.3. Utjecaj konstrukcije komore i šaržiranja

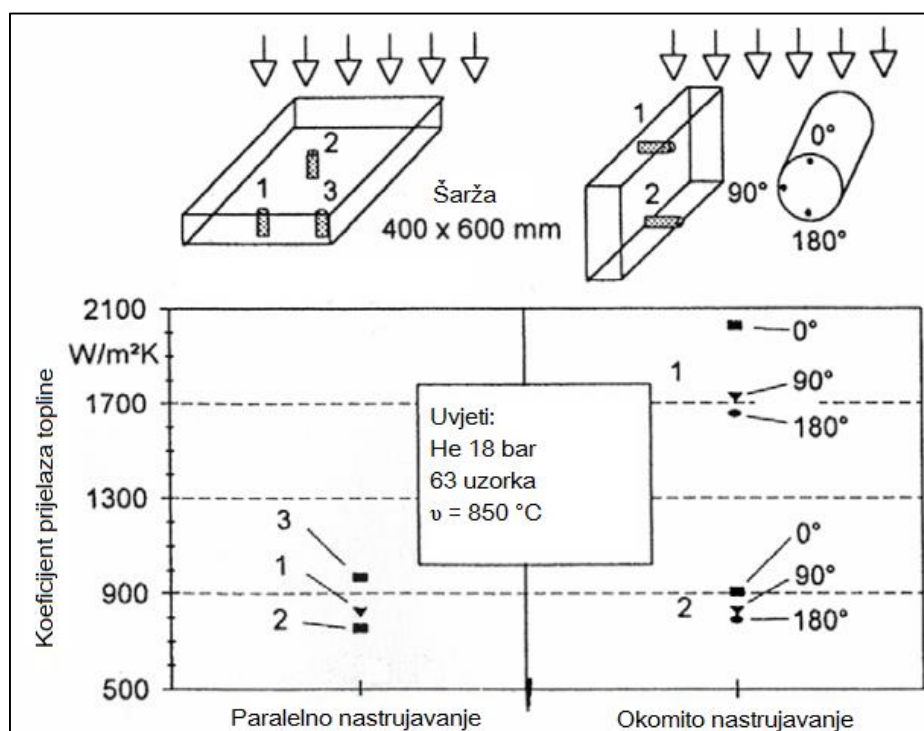
Za različite konstrukcije komora, no za iste parametre postupka (šaržiranje, značajke plina) dolazi do razlika u brzinama ohlađivanja, ali i do drugačije izmjene topline između dijelova u šarži. Pa zavisno o konstrukciji komore i smjera nastrujavanja, bio on radijalan, povratan ili gore-dolje konstruirana je sljedeća slika kojom se pokazuje utjecaj tih dvaju parametara na koeficijent prijelaza topline:



Slika 3.4 Utjecaj šaržiranja na vrijednosti koeficijenta prijelaza topline [6]

Na slici je vidljivo da je radijalnim tokom plina koeficijent poprima najniže vrijednosti, za gore-dolje te vrijednosti se rasipaju od  $600 \text{ W/m}^2\text{K}$  pa sve do  $1000 \text{ W/m}^2\text{K}$ , a za reverzibilan tok te vrijednosti su stabilne u intervalu od  $600 \text{ W/m}^2\text{K}$  do  $800 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Naravno, pri tome se ne smije zanemariti utjecaj šaržiranja tj. pozicije pojedinog dijela unutar šarže. Time se ponovo mijenjaju vrijednosti koeficijenta prijelaza topline u širokom rasponu s obzirom da nisu svi dijelovi uzorka jednako pogođeni strujom plina.

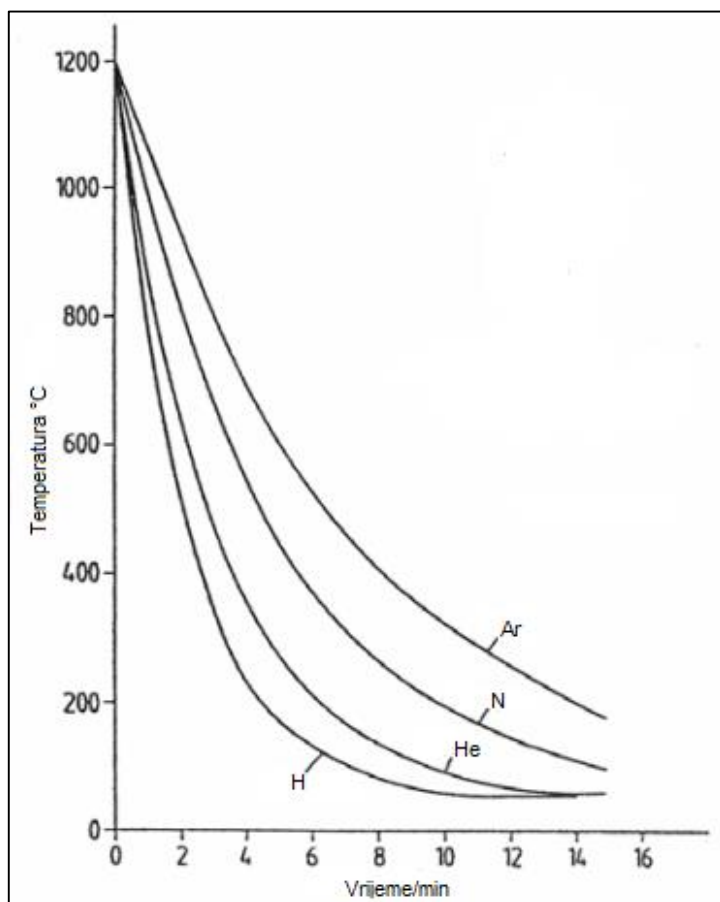


Slika 3.5 Utjecaj vrste nastrujavanja na vrijednosti koeficijenta prijelaza topline [6]

Za cjelokupnu šaržu dimenzija 400x600 mm za 63 uzorka, pri tlaku od 18 bara i hlađenjem s temperature austenitizacije od 850°C pri paralelном nastrujavanju postignute vrijednosti koeficijenta prijelaza topline su od približno 900 W/m<sup>2</sup>K, dok su za okomito nastrujavanje zabilježene vrijednosti od približno 900 W/m<sup>2</sup>K te 1700 W/m<sup>2</sup>K.

### 3.3.4. Utjecaj vrste i parametara plina za gašenje

Nekoliko je tipova plina određeno za korištenje pri ovom pokusu. To su argon, helij, dušik i vodik. Njihova toplinska svojstva uvelike ovise o gustoći pa će se tako za lakše, rjeđe plinove poput helija vrijednosti koeficijenta prijelaza topline nalaziti na višim vrijednostima. Od svih ovih plinova argon se najmanje upotrebljava zbog svoje visoke gustoće. Vodik bi bio idealan plin za čeno gašenje, međutim zbog svoje veoma eksplozivne prirode u dodiru s kisikom iz zraka koristi se samo u najnaprednijim postrojenjima.



Slika 3.6 Utjecaj vrste plina na vrijeme ohlađivanja [6]

Na slici 3.6 prikazan je utjecaj pojedinog plina na vrijeme ohlađivanja za uzorak od M2 alatnog čelika. Kao što je prije navedeno, vodik najviše utječe na sniženje vremena ohlađivanja, dakle ono je najintenzivnije, no zbog svoje pristupačnosti dušik i helij se koriste u puno većoj mjeri. To su inertni plinovi sa malim utjecajem na okoliš. Ne zahtijevaju dodatno čišćenje. Zbog svoje visoke cijene helij se upotrebljava u postrojenjima gdje ga je i moguće reciklirati. S druge strane, dušik sa nešto većom gustoćom, ali nižom cijenom postavlja veća opterećenja na sustave za dobavu plina u komoru.

Prema tome za najbolje rezultate preporučeno je koristiti plin što manje gustoće, pri dovoljno velikom pritisku i sa niskom do srednjom brzinom nastrujavanja. Zbog svojih izrazito slabih karakteristika vidljivo je da se utjecaj plina na proces mora optimizirati variranjem niza parametara. Pri tome se, specijalno za pokus čeonog gašenja koristi sljedeća jednačba [6]:



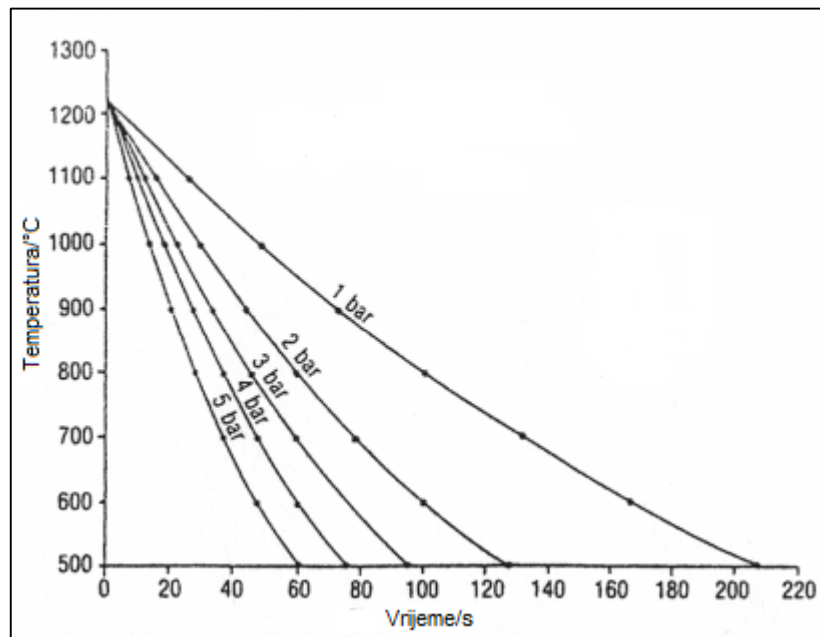
$$\alpha = C \cdot p^{0,7} \cdot v^{0,7} \cdot d^{-0,3} \cdot \eta^{-0,39} \cdot c_p^{0,31} \cdot \lambda^{0,69} \quad (6)$$

gdje je:	C	konstanta ovisna o konstrukciji komore i šarži
	p	tlak
	v	brzina plina
	d	karakteristična dimenzija
	$\eta$	dinamička viskoznost
	$c_p$	specifični toplinski kapacitet
	$\lambda$	koeficijent provođenja topline

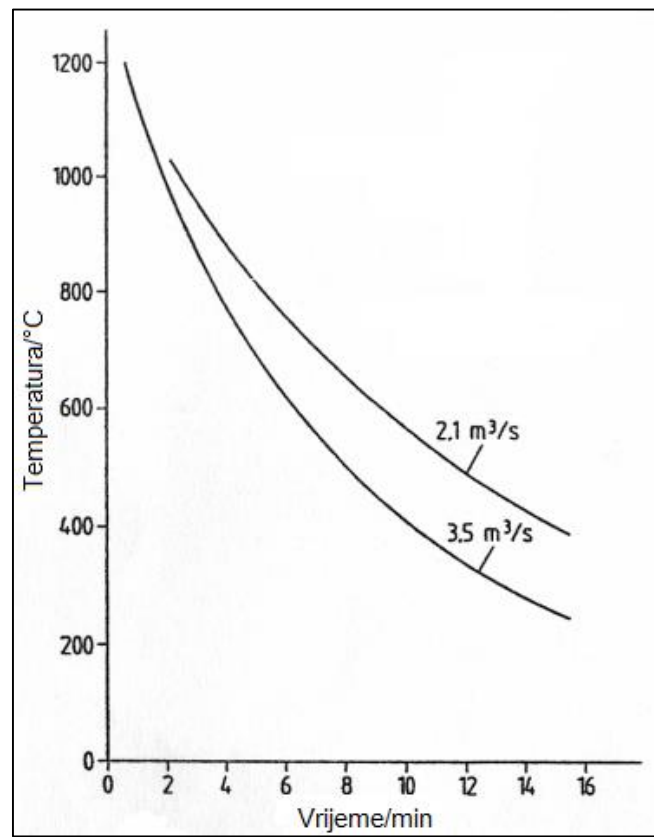
U jednadžbu je uračunat utjecaj tlaka, brzine strujanja, karakteristične dimenzije izratka te nekih toplinskih svojstava plina. Vidljivo je da zbog vrijednosti eksponenata tlak i brzina imaju najveći utjecaj čime bi upravo zbog jednakosti eksponenata dalo se zaključiti da povećanja bilo kojeg od ta dva parametra ne bi bilo razlike u vrijednostima koeficijenta prijelaza topline. Na sljedećoj slici prikazani su utjecaji pritiska i brzine strujanja za uzorke alatnog M2 čelika kaljenog u dušiku.

Povišenjem tlaka snizuje se vrijeme ohlađivanja, povišuje brzina ohlađivanja. Sličan efekt postiže se povećanjem brzine strujanja plina. No, ono što se iz dijagrama ne može očitati jest opterećenje koje se postavlja na sustave dovoda plina. Povećanjem brzine opterećenje se povećava i do 8 puta, dok se tlačenjem na više vrijednosti takvo opterećenje povećava tek neznatno. Dakle više brzine zahtijevat će i porast snage dobavnog sustava plina, a samim time i više troškove električne energije. Zbog toga, u postupcima čeonog gašenja zastupljenije je povećavanje vrijednosti tlaka nad povećavanjem brzine plina. U jednadžbi nije naveden još jedan iznimno važan parametar; temperatura plina.

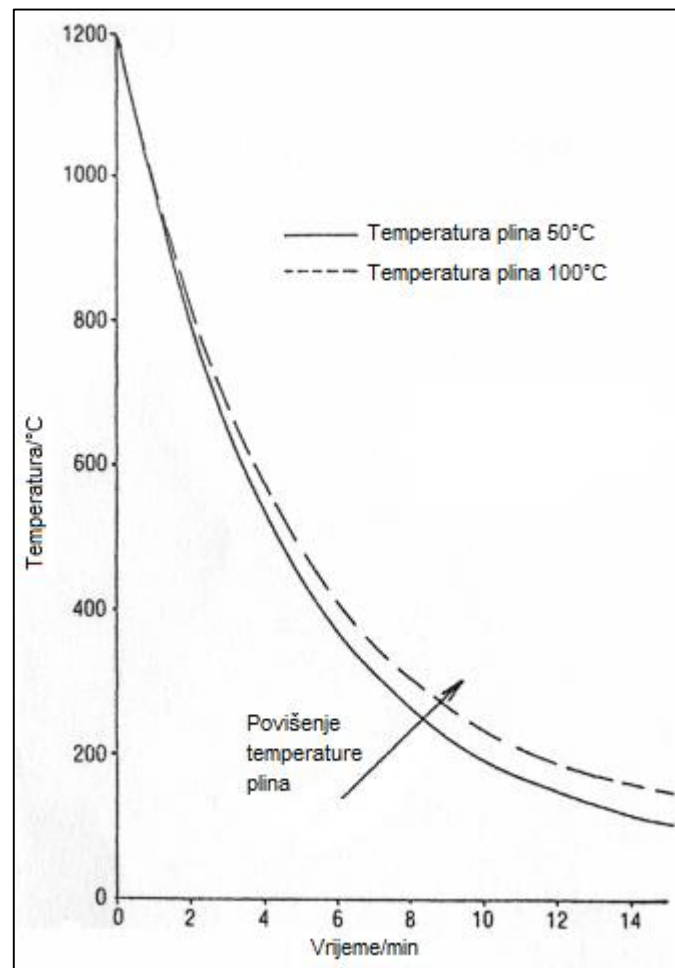
Prolaskom plina kroz komoru za hlađenje isti se ugrijava što od topline koju emitira šarža što od stijenki komore. Ovo je usko vezano za poziciju uzoraka kao što je navedeno ranije. U prvotnim trenucima hlađenja utjecaj plina na dio je minimalan, a odvijanjem procesa taj utjecaj postaje sve većim. Poznavanje temperature nužno je za određivanje koeficijenta prijelaza topline. Na slici 3.8 je vidljivo da povišenje temperature plina produljuje vrijeme hlađenja uzorka kako za površinu tako i za jezgru.



Slika 3.7 Utjecaj tlaka na brzinu ohlađivanja [6]



Slika 3.8 Utjecaj brzine strujanja na brzinu ohlađivanja [6]



Slika 3.9 Utjecaj temperature plina na brzinu ohlađivanja [6]

### 3.4. Model proračuna koeficijenta prijelaza topline

U prethodnim poglavljima definirani su neki od utjecajnih paramtera na pokus čeonog gašenja te je dan svojevrsni recept za određivanje kriterija sičnosti. Prvi korak u određivanju je postavljanje početne jednadžbe koja se u ovom slučaju preuzima iz [7].

$$\frac{\overline{Nu}}{Pr^{0.42}} = G \left( A_r, \frac{H}{D} \right) [2Re^{1/2}(1 + 0.005Re^{0.55})^{1/2}] \quad (7)$$

$$G = 2A_r^{1/2} \frac{1 - 2.2A_r^{1/2}}{1 + 0.2(H/D - 6)A_r^{1/2}} \quad (8)$$

$$A_r = D^2/4r^2 \quad (9)$$

D.... promjer sapnice (m)

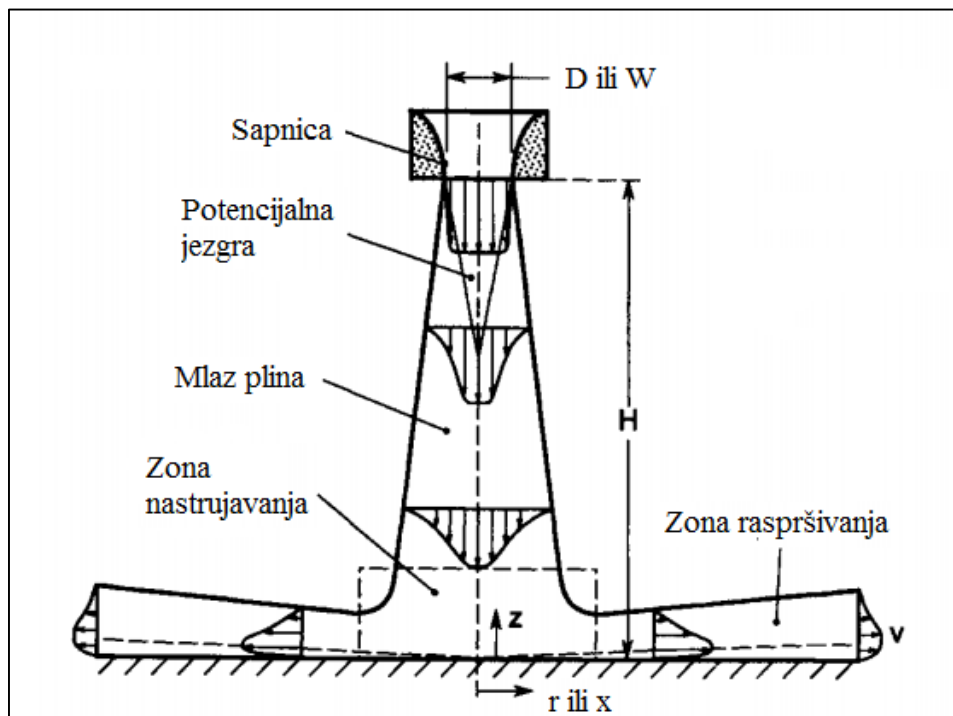
H...udaljenost sapnice i gašenog čela (m)

r ...promjer uzorka (m)

Ostale veličine se očitavaju sa grafičkog prikaza zone nastrujavanja slika (3.10)

Bezdimezionalni paramteri Nu, Re, Pr određuju se za stlačeni plin pri određenoj temperaturi, tlaku i brzini strujanja. Koeficijent prijelaza topline na gašenom čelu izračunava uvrštavanjem vrijednosti navedenih parametra za temperaturni raspon od 800°C do 20°C korištenjem sljedeće jednadžbe:

$$\alpha = \lambda \cdot Nu \cdot D \quad (10)$$



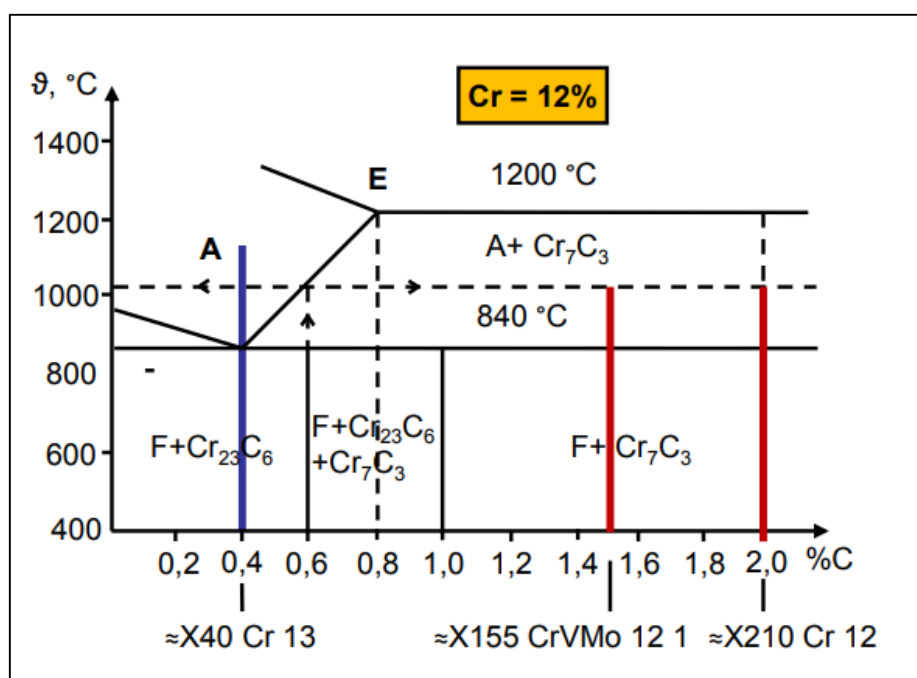
Slika 3.10 Zona nastrujavanja u slučaju jedne mlaznice [8]

Gdje je  $\lambda$  koeficijent prolaza topline za ispitivani čelik. Podatak o vrijednosti koeficijenta prijelaza topline kasnije se upotrebljava pri rješavanju termodinamičkog problema hlađenja ispitnog uzorka.

# EKSPERIMENTALNI DIO

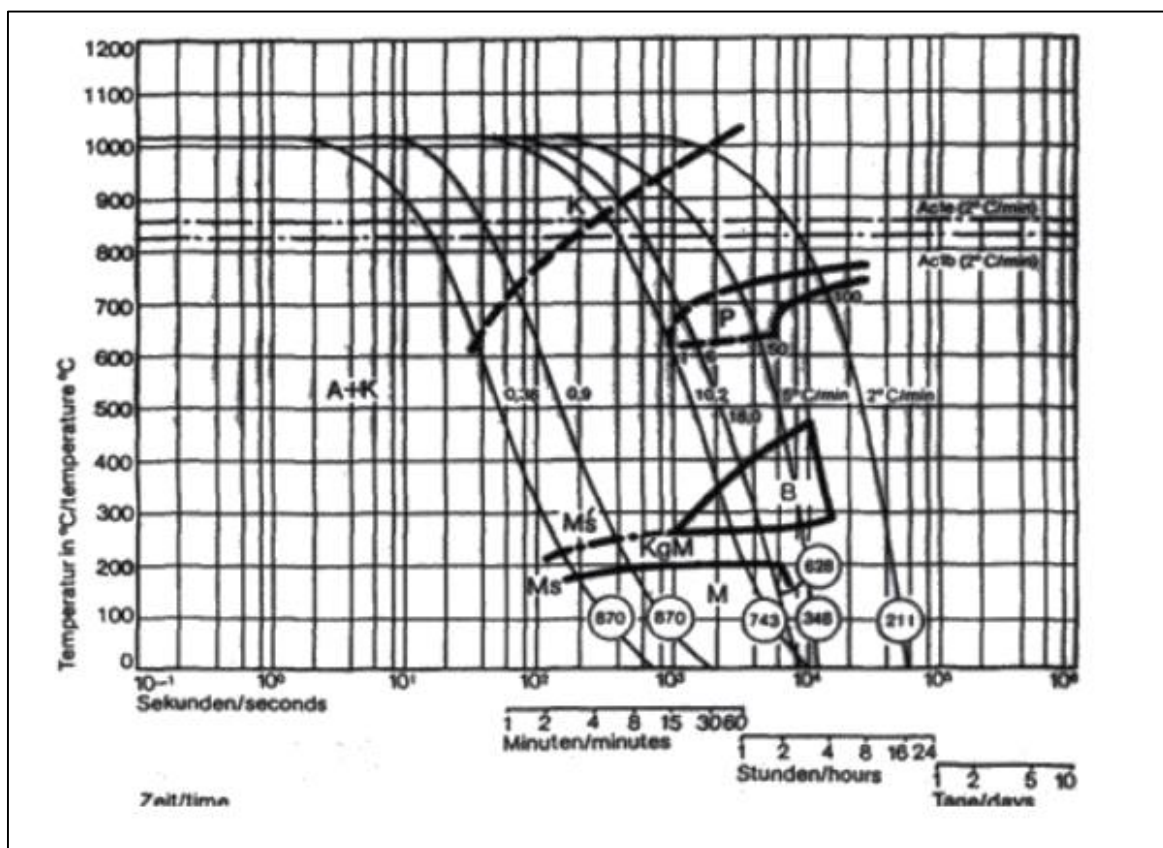
#### 4. PLAN I PROVEDBA EKSPERIMENTA

Ekspiriment gašenja visokolegiranog alatnog čelika X155CrMoV12-1 (1,55% C, 0,25% Si, 0,35% Mn, 11,80% Cr, 0,80% Mo, 0,95 %V) izveden je na uzorku od četiri epruvete prilagođenih dimenzija. Na slici 4.11 prikazan je pseudobinarni dijagram za određivanje temperature austenitizacije čelika čelika X155CrVMo12-1. Na slici 4.12 prikazan je njegov kontinuirani TTT dijagram. Na temelju dijagrama 4.11 i preporuka proizvođača izabrana je temperatura austenitizacije 1020°C i režim predgrijavanja. Epruvete su toplinski obrađene prema dijagramu postupka na slici 4.3.

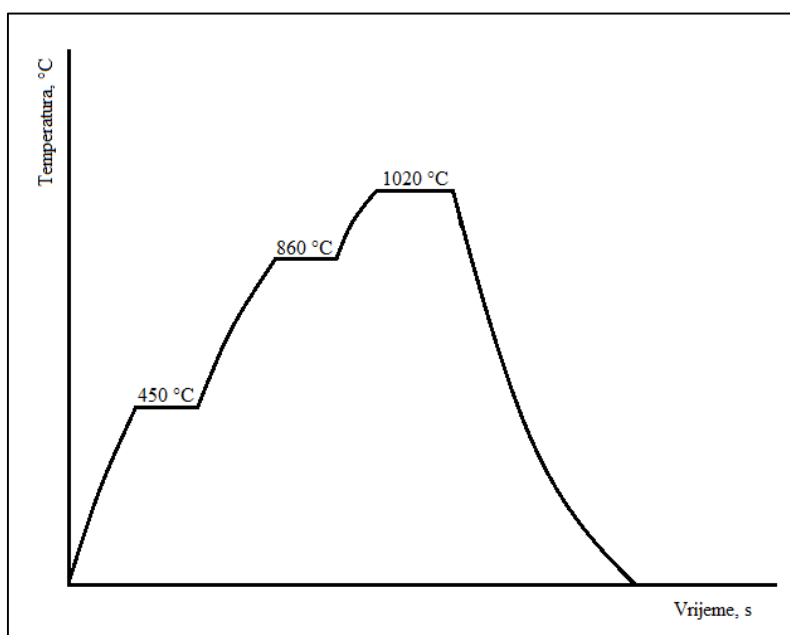


Slika 4.1 Pseudobinarni dijagram stanja Fe-Cr-C [9]





Slika 4.2 Kontinuirani TTT dijagram X155CrVMo12-1 čelika [9]



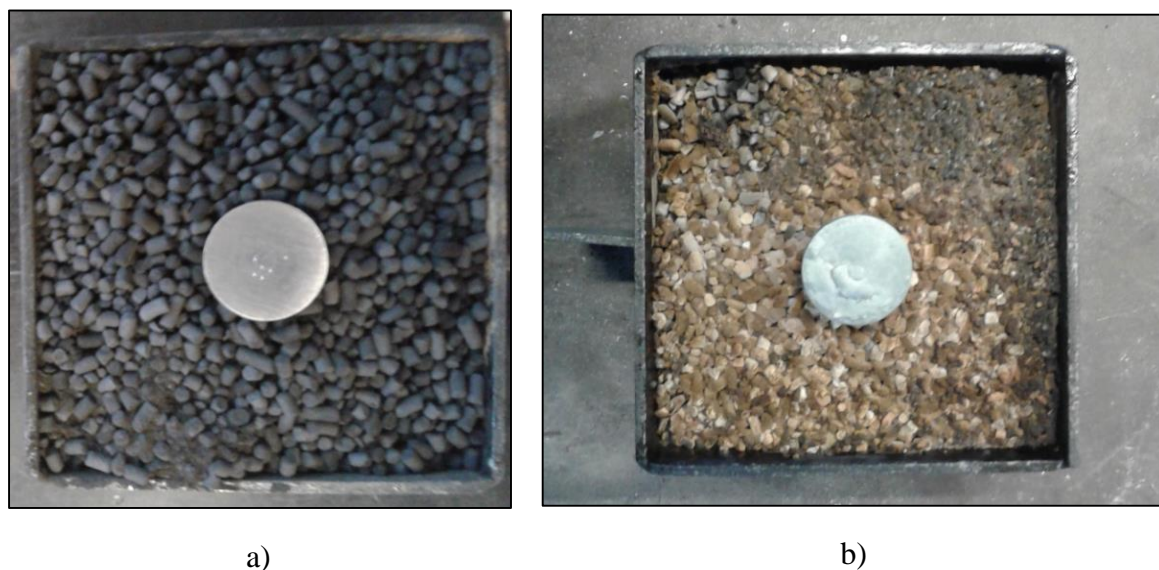
**Slika 4.3** Dijagram postupka toplinske obrade X155CrVMo12-1 – hlađenje u granulatu

U sljedećoj tablici zadani su parametri režima ugrijavanja u granulatu na zadane temperature.

**Tablica 4.1** Režim ugrijavanja na temperaturu austenitizacije

Temperaturni interval, °C	Vrijeme ugrijavanja za zadani temperaturni interval, min
20...445	15
445...455	60
455...855	15
855...865	60
865...1015	15
1015...1020	60

Epruvete su postavljene u, za ovaj slučaj, posebno izrađenu metalnu konstrukciju sa punjenjem u vidu granulata za pougljičavanje. Nakon procesa grijanja, epruvete su pojedinačno hladene u spomenutom granulatu sa izloženim čelom. (Slika 4.4).



**Slika 4.4 Toplinska izolacija epruvete granulatom za pougljičavanje: a) prije ugrijavanja, b) nakon ohlađivanja**

Granulat pri tome nije negativno utjecao na pokus te je njegova glavna svrha produljenje vremena ohlađivanja epruvete kako bi se simulirali uvjeti dobiveni gašenjem u struji stlačenog zraka. Metalna posuda postavljena je u električnu peć te su, kako je prikazano na slici 4.3 predgrijavane tri puta sa završno donjom temperaturom austenitizacije ispitivanog čelika.

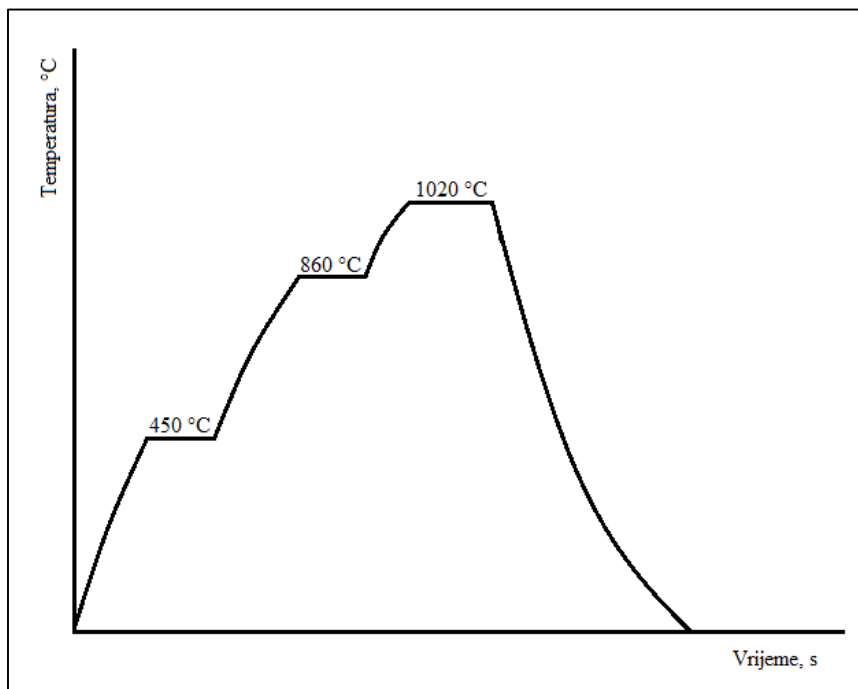


**Slika 4.5** Električna peč za toplinsku obradu ohlađivanjem u granulatu

Za drugi par epruveta, radi komplikacija nastalih prilikom korištenja električne peći i plina argona, izmijenjena su vremena predgrijavanja kako je prikazano u tablici 4.2.

**Tablica 4.2** Režim ugrijavanja na temperaturu austenitizacije

Temperatura, °C	Vrijeme, min
20...445	45
445...455	60
455..855	45
855...865	30
865...1015	60
1015...1020	30



**Slika 4.6** Dijagram postupka toplinske obrade X155CrVMo12-1 – hlađenje u toplinskoj izolaciji

Ispitni uzorci su postavljeni u električnu peć (slika 4.7) na improviziranom „podiju“ za olakšano vađenje iz komore peći. kao što je prikazano na slici 4.8.



**Slika 4.7** Peć za toplinsku obradu u zaštitnoj atmosferi argona



**Slika 4.8** Ispitni uzorak na povišenom podiju unutar peći za toplinsku obradu

Nakon procesa grijanja umetnute su u izolacijsku posudu gdje je kao insulator upotrijebljena aluminijsko-silikatna izolacijska vuna sastavljena od 48%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i 52%  $\text{SiO}_2$ . Pritom je čelo epruvete bilo izloženo mirnom zraku kako je prikazano na slici 4.9. Nakon postupka toplinske obrade po jedna epruveta iz svakog para ispitivana je infracrvenim termometrom UNI-T UT3020 u svrhu određivanja srednje brzine ohlađivanja.



**Slika 4.9** Ispitni uzorak ohlađen u izolaciji od aluminijsko silikatne izolacijske vune

Nadalje, provedeno je ispitivanje tvrdoće po metodi Rockwell C na sve četiri epruvete uporabom tvrdomjera na slici:



**Slika 4.10** Tvrdomjer za ispitivanje po metodi Rockwell C

Epruvete su prethodno mehanički brušene kako bi se dobila pogodna površina za ispitivanje tvrdoće.



**Slika 4.11** Izbrušene epruvete

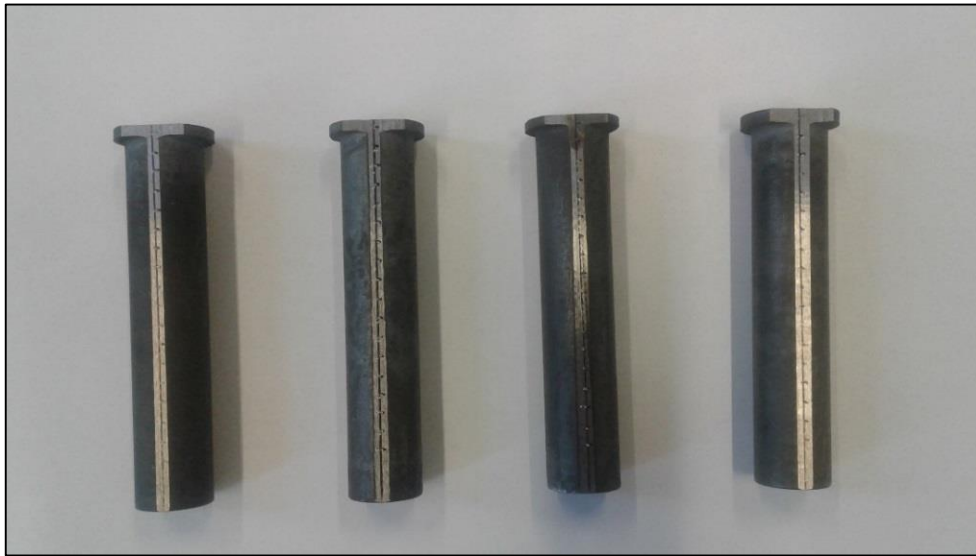


Nakon toga na svakoj strani epruvete naznačene su točke za ispitivanje tvrdoće u pravilnim udaljenostima od pet milimetara kako je prikazano na slici:



**Slika 4.12 Označene epruvete**

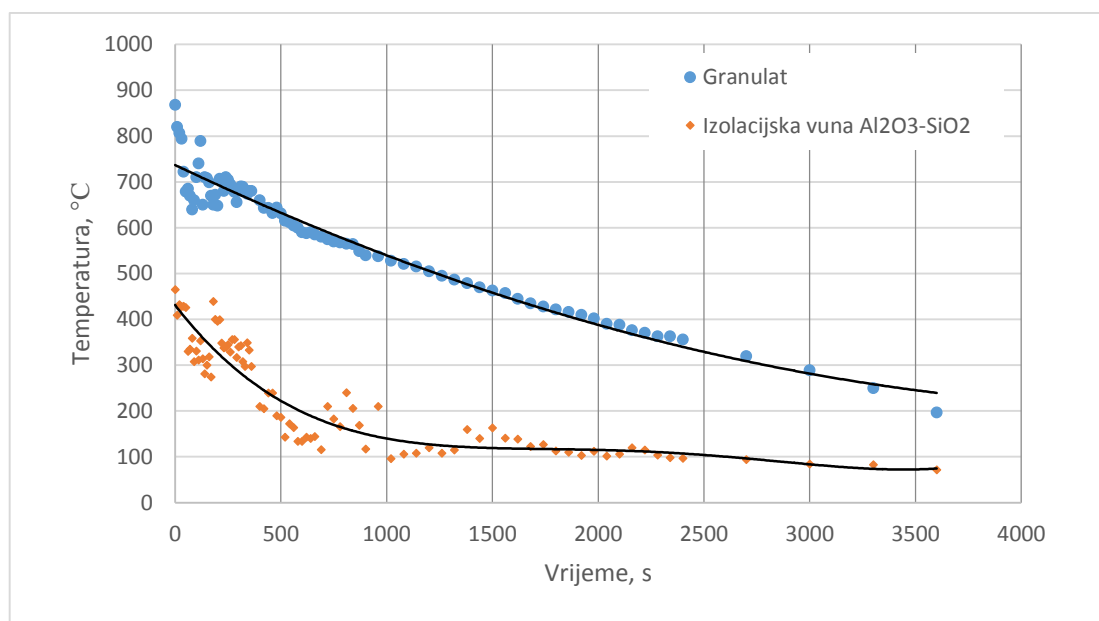
Svaka epruveta ispitivana je na 36 točaka po svojoj duljini, po 18 sa svake strane sa silom opterećenja od  $F_N=1471$  N. Točke ispitivanja tvrdoće zorne su na donjoj slici. Potom su, za precizno konstruiranje Jominy krivulja prokaljivosti, udaljenosti između pojedinih točaka izmjerene digitalnim pomičnim mjerilom.



**Slika 4.13 Ispitivane epruvete**

## 5. REZULTATI ISPITIVANJA I ANALIZA REZULTATA

Nakon provođenja ispitivanja infracrvenim termometrom (tablica u Prilogu 1.) dobivene su krivulje ohlađivanja čela ispitnih uzoraka uloženi u granulatu i izolacijsku vunu (slika 5.1). Za hlađenje u granulatu vidljivo je polagano snižavanje temperature, nakon početnog bržeg ohlađivanja. Nakon vremena ohlađivanja od 500 sekundi snižavanje temperature čela je praktički linearno ovisno o vremenu hlađenja. Za epruvetu ohlađenu u napravi s toplinskom izolacijom uočava se brzo početno ohlađivanje i do temperature oko 450°C. Daljnje snižavanje temperature čela uzorka je nelinearno ovisno o vremenu i svojim tijekom krivulje temperatura – vrijeme odgovara procesu hlađenja slobodnom konvekcijom.



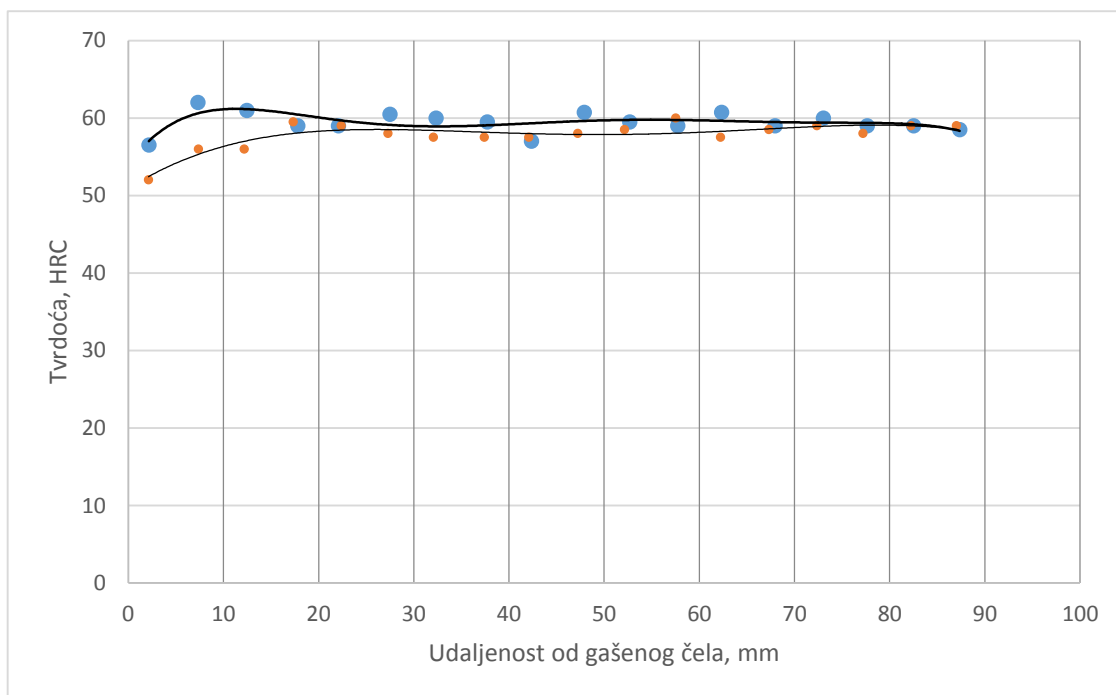
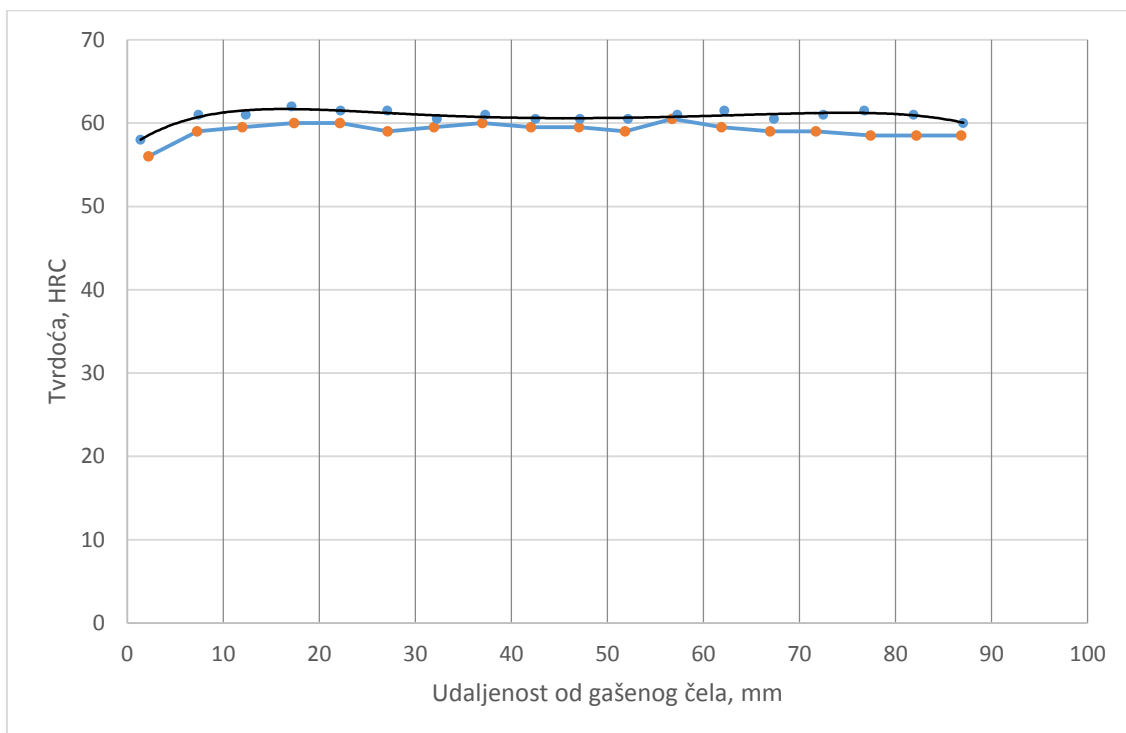
**Slika 5.1** Krivulja hlađenja čela ispitnih epruveta u granulatu i izolacijskoj vuni

Iz dijagrama ovisnosti temperature o vremenu hlađenja čela određeni su podaci o srednjoj brzini hlađenja. Zbog brze promjene temperature na čelu uzorka koju je bilo teško pratiti vizualnim očitanjem na infracrvenom termometru određena je srednja brzina i vrijeme

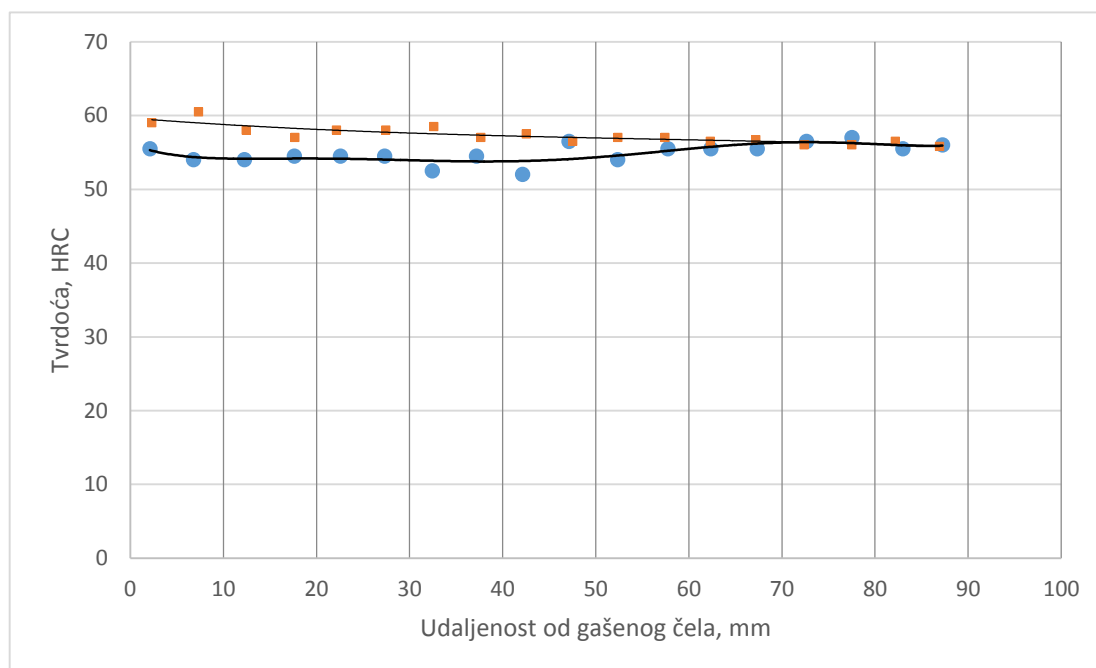
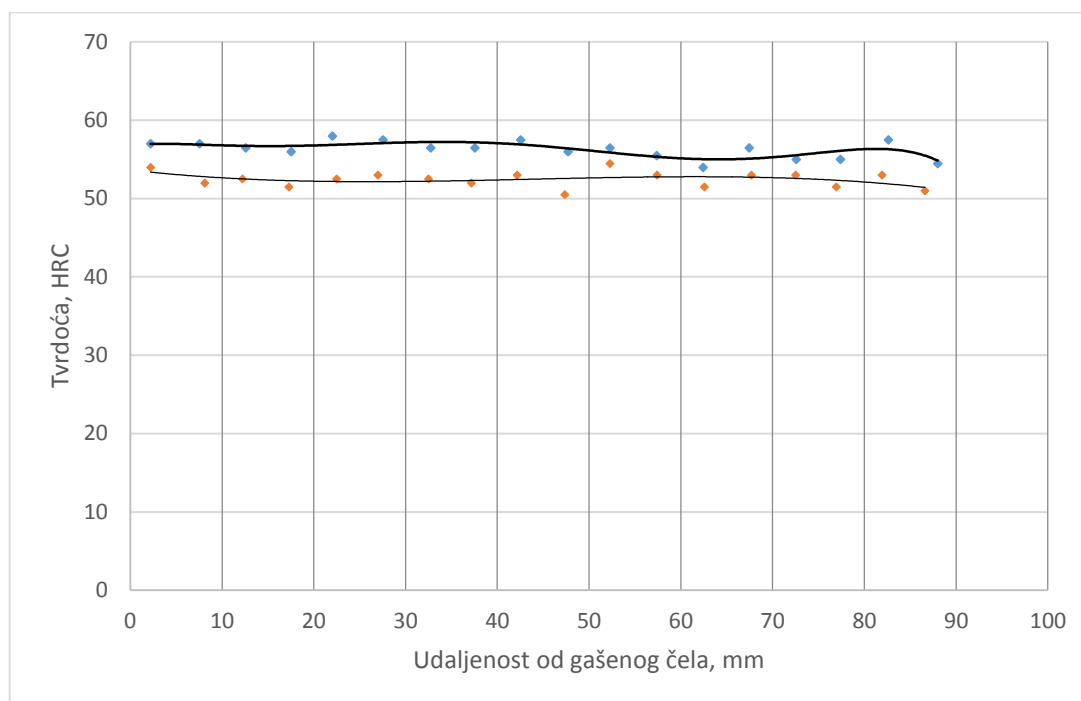
hlađenja u intervalu od 700 °C do 300 °C umjesto u literaturi uobičajenog intervala temperatura od 800 °C do 500°C. Iz analize krivulja ohlađivanja prikazanih na slici 5.1 metodom linearne regresije na intervalu temperatura od 700 do 300 °C. određene su sljedeće srednje brzine hlađenja čela epruveta:

- a) hlađenje ispitne epruvete u granulatu  $v_{hl} = 0.1575 \text{ °C/s}$
- b) hlađenje ispitne epruvete u izolacijskoj vuni  $v_{hl} = 0.3569 \text{ °C/s}$

Sljedeće krivulje prokaljivosti izvedene su iz podataka dobivenih za sve 4 epruvete. Podaci su priloženi u tablicama u Prilogu 2-5.



**Slika 5.2** Krivulja prokaljivosti epruveta 1 i 4 ohlajenih s temperature 1020°C u granulatu



**Slika 5.3** Krivulja prokaljivosti epruveta 2 i 3 ohlajenih s temperature 1020°C u izolacijskoj vuni

Iz rezultata prikazanih u prethodnim dijagramima vidljive su jasne razlike između parova epruveta hlađenih u izolacijskoj posudi i onih hlađenih u granulatu. Za par epruveta 1-4 evidentna je relativno dobra prokaljivost epruvete te vrijednosti tvrdoće iznose oko 60 HRC.

Na drugom paru epruveta 2-3 hlađenom u izolacijskoj vuni vrijednosti tvrdoće su pretežno raspršene po mjernom području, no vidljiv je trend sniženja tvrdoće do vrijednosti od približno 52 HRC.

Budući da je ovdje prisutno vrlo brzo ohlađivanje te vrijednosti tvrdoće korespondiraju s iznosima tvrdoće za martenzitnu mikrostrukturu. Stoga se može zaključiti da se ovim režimom ohlađivanja postiže ujednačena martenzitna mikrostruktura po cijelom presjeku te se neće dostići područje faza manje tvrdoće, no vrijednosti iste ipak pokazuju određeno sniženje tvrdoće na dijelu epruveta.

### 5.1. Pokus čeonog gašenja nastrujavanjem stlačenog plina

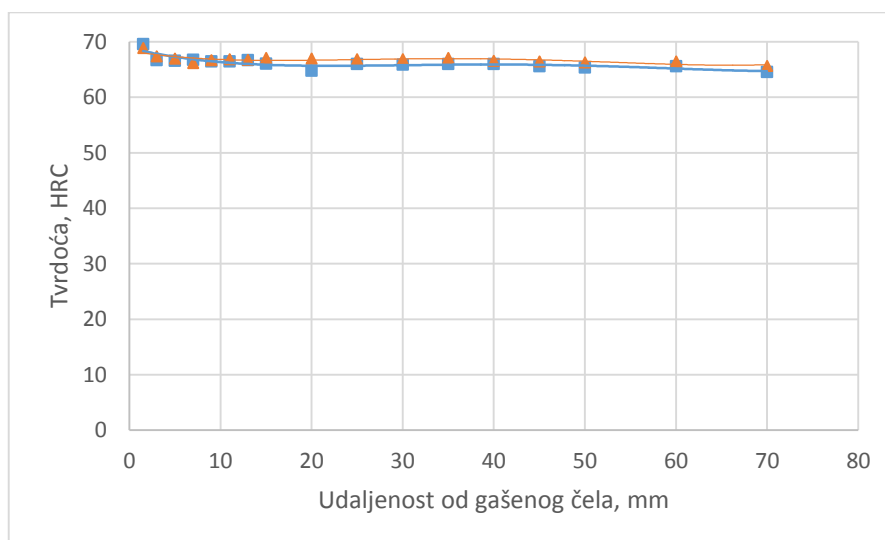
Budući da je zbog tehničkih poteškoća onemogućena potpuna izvedba pokusa čeonog gašenja te su zamjenski uzeta dva slučaja za ohlađivanje u granulatu i ohlađivanje u izolacijskoj vuni podaci predstavljeni u sljedećim tablicama (Prilog 6.) i dijagramima vrijede za ranija istraživanja [3] u istom području te kao takvi služe isključivo za usporedbu sa podacima dobivenim u ovdje izvedenom eksperimentu. Pokus se izvodi u komori prikazanoj na sljedećoj slici:



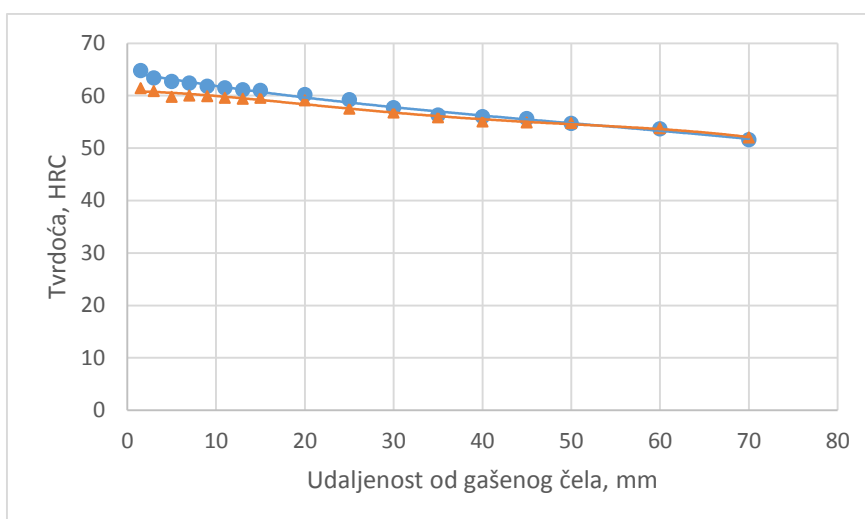
**Slika 5.4** Aparatura za pokus čeonog gašenja nastrujavanjem stlačenog plina

Princip rada opisan je u poglavlju 2, a detaljnija shema uređaja na slici 2.6. Najvažniji razlog uporabe ovakvog uređaja jest postizanje jednodimenzijskog ohlađivanja ili hlađenja samo čela ispitivane epruvete pri čemu se tijelo epruvete hladi mnogo sporije. U eksperimentu su ispitivane dvije epruvete pri zadanim uvjetima [1 bar, 15 m/s] te su gašene strujom stlačenog dušika. Nakon provedbe pokusa gašenja epruvete su ispitivane na tvrdoću metodom Rockwell C po izvodnici te su dobivene krivulje prokaljivosti prikazane na slikama 5.7 i 5.8.





Slika 5.5 Krivulje prokaljivosti za epruvetu 1 [ $\theta_a=950^\circ\text{C}$ ]



Slika 5.6 Krivulje prokaljivosti za epruvetu 2 [ $\theta_a=850^\circ\text{C}$ ]

Iz slike 5.7 vidljiva je donekle konstantna vrijednost tvrdoće povećanjem udaljenosti od gašenog čela gdje se vrijednosti tvrdoće nalaze od približno 70 HRC na čelu, što je malo iznad mjernog područja, do približno 66.5 HRC. Za epruvetu gašenu s temperature austenitizacije  $\theta_a=850^\circ\text{C}$  pad tvrdoće je mnogo jače izražen te se vrijednosti nalaze u intervalu od oko 63 HRC do 55 HRC. Iz podataka navedenih u Prilogu 7. računa se srednje vrijeme hlađenja  $t_{8/5}$ , a iz njega i srednja brzina ohlađivanja koja iznosi  $v_{hl} = 2.64614^\circ\text{C/s}$ .

## 5.2. Proračun koeficijenta prijelaza topline

Za podatke dobivene iz provedenog eksperimenta hlađenjem u granulatu i izolacijskoj vuni te podataka dobivenih iz pokusa čeonog gašenja planiran je izračun koeficijenta prijelaza topline koji bi poslužio za daljnja istraživanja. Pri tome se koristi model predstavljen u potpoglavlju 3.4. Vrijednosti bezdimenzijskih veličina uzimaju se za vrijednost temperature na početku gašenja što je za provedene eksperimente upravo temperatura austenitizacije. U slučaju pokusa čeonog gašenja temperature austenitizacije za dodatne dvije epruvete su dane u Prilogu 6. Pri tome je bitno naglasiti da se vrijednosti bezdimenzijskih parametara računaju ovisno o svojstvima plina u kojem je pojedina epruveta gašena. Tako će se za slučaj epruveta u izvedenom eksperimentu koristiti svojstva zraka pri atmosferskom tlaku od 1 bar pri mirnom zraku, a za ispitivanja provedena na institutu u Bremenu svojstva dušika pri uvjetima 1 bar, 15 m/s.

Budući da predložena i dodatna literatura u vidu toplinskih tablica ne sadrži podatke o kinematičkoj viskoznosti, specifičnom toplinskom kapacitetu te ostalim parametrima dušika pri temperaturama višim od 800°C bitnih za izračun bezdimenzijskih vrijednosti, a time i koeficijenta prijelaza topline, daljni izračun provodit će se za dostupne podatke pri maksimalnoj temperaturi dušika navedenoj u literaturi.

**Tablica 5.1 Toplinska svojstva dušika pri tlaku 1 bar**

DUŠIK				
Molarna masa: 28.013 kg/kmol				
Plinska konstanta: 296.798 J/(kgK)				
$\theta$ , °C	$\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	$c_p$ , kJ/(kg K)	$\lambda$ , W/(m K)	$\mu$ , Pa s
800	0,3082	1,1852	$66,966 \cdot 10^{-3}$	$42,539 \cdot 10^{-6}$

Pri tome se polazi od početne jednadžbe navedene u potpoglavlju 3.4.

$$\frac{Nu}{Pr^{0.42}} = G \left( Ar, \frac{H}{D} \right) [2Re^{1/2}(1 + 0.005Re^{0.55})^{1/2}] \quad (11)$$

Primjenom preostalih jednadžbu u istom potpoglavlju te uvrštavanjem parametara dušika navedenih u tablici 5.1 [10] za temperaturu 800°C pri tlaku 1 bar, dobiva se vrijednost koeficijenta prijelaza topline u iznosu od  $\alpha = 19,07720 \cdot 10^{-3} \text{ W/m}^2\text{K}$ .

### 5.3. Diskusija rezultata ispitivanja prokaljivosti

Rezultati dobiveni nakon ispitivanja infracrvenim termometrom te konstruiranja krivulja ohlađivanja iskazani su i vidu vrijednosti srednjih brzina hlađenja čela gašenog uzorka. Vrijednost srednje brzine za slučaj hlađenja u granulatu približno je dva puta manja od one za slučaj izolacijske vune. U usporedbi sa srednjom brzinom ohlađivanja dobivenoj iz podataka istraživanja u IWT Bremen, ovi rezultati su bitno niži što je i za očekivati s obzirom da je hlađenje izvršeno na mirnom zraku i toplinskoj izolaciji.

Podaci o tvrdoći za epruvete 1 i 4 (hlađenje u granulatu) pretežno se nalaze oko vrijednosti od 60 HRC za oba ispitivana niza. Iako je vrijednost na čelu nešto niža, njezin utjecaj je zanemariv i pripisuje se neznatnom razugljichenju čela epruvete izloženog mirnom zraku. Za par epruveta 2 i 3 hlađenih u izolacijskoj vuni vrijednosti tvrdoće se nalaze u užem pojasu koji je posljedica neravnomjernog kontakta epruvete i izolacijske vune pri hlađenju.

Dodatno, računski određena vrijednost koeficijenta prijelaza topline može poslužiti kao referentna vrijednost u daljnjim istraživanjima.

Usporedbom rezultata ispitivanja prokaljivosti gašenjem u stlačenom dušiku tlaka 1 bar i prokaljivosti epruveta gašenih u izolacijskoj napravi vidljiva je dobra prokaljivost i slične vrijednosti tvrdoća za uzorak austenitiziran u zaštitnoj atmosferi Ar na 1020 °C i uzorak austenitiziran u vakumskoj komori na 950°C i čeono gašen u struji stlačenog dušika.

Krivulje prokaljivosti uzoraka gašenih u vakuumskoj komori s temperature austenitizacije 850°C pokazuju sniženje tvrdoće duž ispitne epruvete, ali ovo sniženje je, čini se, posljedica austenitizacije na temperaturi  $A_1$  ili blizu nje koje nije dalo dovoljno otopljenog ugljika u austenitu da bi se nakon kaljenja postigla najviša tvrdoća karakteristična za čelik X155CrVMo12-1. Usporedba krivulja prokaljivosti na slikama 5.7 i 5.8 ispitanih na istoj vrsti čelika gašenog u istim uvjetima nastrujavanja stlačenog plina, ali prethodno austenitiziranog na različitim temperaturama austenitizacije ukazuje na značajnu ulogu ugljika otopljenog u austenitu na prokaljivost ispitivanog čelika. To se može jasno očitati sa slike 4.1 gdje je pri temperaturi austenitizacije neznatno iznad  $A_1$  otopljeno oko 0,45 %C, što je još uvijek nedovoljno za potpunu austenitizaciju realnih uzoraka, dok bi se povećanjem temperature austenitizacije na vrijednosti 840°C i više povisio postotak otopljenog ugljika, a time i poboljšala prokaljivost.

## 6. ZAKLJUČAK

U radu je razmatran izbor metoda za ispitivanje prokaljivosti dobro prokaljivih alatnih čelika dostupnih u literaturi (metoda po Timkenu, metoda po Noriju, metoda gašenja čela uzorka u struji stlačenog plina). Iz pregleda spomenutih metoda vidljivo je da, iako u aktivnoj upotrebi, iste često uzrokuju probleme u vidu izrade, cijene materijala i općenite izvedbe. Shodno tome, konstantno se razvijaju novi pristupi rješavanja problematike prokaljivanja spomenutih čelika.

U eksperimentalnom dijelu rada proveden je pokus čeonog gašenja s usporavanjem ohlađivanja epruveta od čelika X155CrVMo12-1 primjenom keramičko-silikatne izolacije i granulata u izolacijskoj napravi. Svi su uzorci pokazali visoke vrijednosti tvrdoća po izvodnici, a par epruveta ohlađivan u izolaciji od keramičke vune pokazao je i određen trend sniženja tvrdoće po dužini ispitne epruvete. S druge strane, krivulja hlađenja epruveta hlađenih u granulatu mnogo je stabilnija od iste krivulje za slučaj keramičke izolacijske vune. Zbog visoke brzine hlađenja takvi rezultati su u skladu s onima koji se predviđaju iz pripadajućeg dijagrama kontinuiranog ohlađivanja X155CrVMo12-1 čelika. Rezultati vlastitih ispitivanja uspoređeni su s rezultatima ispitivanja iste vrste čelika čeonim gašenjem u stlačenom dušiku provedenim u posebno konstruiranoj vakuumskoj komori.

Na osnovi rezultata dobivenih eksperimentalnim putem i razmatranja do sada korištenih metoda moguće je uočiti da će ovakvi, isplativiji pristupi problematici, uroditi relativno stabilnim rezultatima koji bi se dobili upotrebom konvencionalnih metoda. Potrebno je, u svrhu optimiranja rezultata, uložiti stanovite resurse u poboljšanje opreme, kako za izvedbu pokusa tako i za analizu svojstava dobivenih istima. Daljnjim modifikacijama dimenzija uzorka i vrste izolacijskog materijala omogućilo bi širi spektar tvrdoća po izvodnici epruvete što bi potencijalno učinilo ove prilagodbe metoda primjenjivima kako na druge vrste čeličnih materijala tako i u industrijske svrhe.

## LITERATURA

- [1] Stupnišek M., Cajner F., *Osnove toplinske obrade metala*, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, Zagreb, 2001.
- [2] ASM Metals Handbook Vol 04, ASM International, Metals Park, USA, 1994
- [3] Landek D., Liščić B., Filetin T., Lübben T., Lisjak D., *Hardenability Testing and Simulation of Gas-Quenched Steels*, Materials and Manufacturing Processes, Volume 24, Issue 7&8 July, 2009, 868-872
- [4] Virag Ž., Šavar M., Džijan I., *Mehanika fluida I Predavanja*, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, Zagreb, 2017.
- [5] Lubben T., Hoffman F., Mayr P., Laumen C., *Gas Quenching: Influence of Diameter and Heat Transfer Coefficient on Hardness for Different Steel Grades*, proceedings of the 21st conference, 5-8 November, 2001, Indianapolis, Indiana, 83-92
- [6] Liščić B., *High Pressure Gas Quenching in Vacuum Furnaces*, Workshop on Quenching, National Institute of Technology Karnataka, 2008.
- [7] Martin H., *Heat and Mass Transfer between Impinging Gas Jets and Solid Surfaces; Advances in Heat Transfer*, Vol 13, Academic Press, New York, 1997
- [8] Viskanta R., Bergman T.L., *Heat Transfer in Materials Processing*, Handbook of Heat Transfer, McGraw-Hill, New York, 1998.
- [9] Landek D., *Posebni metalni materijali (autorizirane podloge za predavanja iz područja alatnih materijala)*, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, Zagreb, 2016.
- [10] Halasz B., Galović A., Boras I., *Toplinske tablice*, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, Zagreb, 2017.

**PRILOZI**

Prilog 1. Vrijednosti temperature gašenog čela u ovisnosti o vremenu

Vrijeme /s	Temperatura (slučaj granulata) /°C	Temperatura (slučaj staklene vune) /°C
0	868	465
10	820	409
20	807	432
30	794	428
40	722	429
50	679	426
60	685	330
70	670	335
80	640	359
90	660	308
100	710	331
110	740	311
120	789	353
130	650	314
140	710	281
150	708	300
160	699	318
170	670	274
180	650	439
190	672	400
200	648	396

210	707	399
220	702	348
230	680	338
240	710	339
250	705	345
260	695	329
270	688	356
280	678	356
290	656	317
300	680	340
310	690	343
320	689	308
330	680	297
340	674	349
350	680	333
360	680	297
400	660	210
420	643	205
440	643	239
460	632	239
480	644	190
500	631	186
520	615	143
540	612	172
560	605	164
580	600	134



600	590	134
620	588	143
640	590	140
660	585	144
690	580	116
720	575	210
750	570	183
780	568	166
810	565	240
840	564	206
870	549	169
900	540	117
960	538	210
1020	528	96
1080	521	106
1140	515	108
1200	505	120
1260	495	108
1320	487	115
1380	479	160
1440	470	140
1500	463	163
1560	457	141
1620	445	139
1680	435	123
1740	428	127

1800	422	113
1860	416	110
1920	410	103
1980	402	112
2040	390	102
2100	388	106
2160	376	120
2220	371	115
2280	363	104
2340	363	98
2400	356	97
2700	320	94
3000	289	84
3300	250	83
3600	197	72

Prilog 2. Vrijednosti ispitane tvrdoće za epruvetu 1

1_1 tvrdoća, HRC	1_1 udaljenost od gašenog čela, mm	1_2 tvrdoća HRC	1_2 udaljenost od gašenog čela, mm
56.00	2.22	58.00	1.38
59.00	7.31	61.00	7.43
59.50	11.98	61.00	12.36
60.00	17.41	62.00	17.12
60.00	22.15	61.50	22.24
59.00	27.13	61.50	27.10
59.50	31.95	60.50	32.27
60.00	37.00	61.00	37.29
59.50	42.08	60.50	42.54
59.50	47.08	60.50	47.18
59.00	51.87	60.50	52.16
60.50	56.75	61.00	57.29
59.50	61.91	61.50	62.20
59.00	66.96	60.50	67.36
59.00	71.74	61.00	72.50
58.50	77.43	61.50	76.78
58.50	82.19	61.00	81.89
58.50	86.85	60.00	87.05

Prilog 3. Vrijednosti ispitane tvrdoće za epruvetu 2

2_1 tvrdoća, HRC	2_1 udaljenost od gašenog čela, mm	2_2 tvrdoća, HRC	2_2 udaljenost od gašenog čela, mm
54.00	2.21	57.00	2.21
52.00	8.09	57.00	7.54
52.50	12.23	56.50	12.58
51.50	17.28	56.00	17.53
52.50	22.48	58.00	22.03
53.00	26.98	57.50	27.53
52.50	32.47	56.50	32.71
52.00	37.14	56.50	37.55
53.00	42.16	57.50	42.52
50.50	47.36	56.00	47.68
54.50	52.25	56.50	52.27
53.00	57.39	55.50	57.35
51.50	62.54	54.00	62.41
53.00	67.68	56.50	67.43
53.00	72.50	55.00	72.58
51.50	76.91	55.00	77.39
53.00	81.92	57.50	82.61
51.00	86.59	54.50	87.99

Prilog 4. Vrijednosti ispitane tvrdoće za epruvetu 3

3_1 tvrdoća, HRC	3_1 udaljenost od gašenog čela, mm	3_2 tvrdoća, HRC	3_2 udaljenost od gašenog čela, mm
59.00	2.31	55.50	2.09
60.50	7.33	54.00	6.78
58.00	12.46	54.00	12.24
57.00	17.68	54.50	17.60
58.00	22.16	54.50	22.56
58.00	27.43	54.50	27.29
58.50	32.61	52.50	32.43
57.00	37.65	54.50	37.16
57.50	42.54	52.00	42.14
56.50	47.54	56.50	47.10
57.00	52.36	54.00	52.34
57.00	57.42	55.50	57.73
56.50	62.30	55.50	62.33
56.70	67.21	55.50	67.32
56.00	72.39	56.50	72.64
56.00	77.50	57.00	77.52
56.50	82.19	55.50	82.98
55.80	86.92	56.00	87.25

Prilog 5. Vrijednosti ispitane tvrdoće za epruvetu 4

4_1 tvrdoća, HRC	4_1 udaljenost od gašenog čela, mm	4_2 tvrdoća, HRC	4_2 udaljenost od gašenog čela, mm
56.50	2.15	52.00	2.11
62.00	7.31	56.00	7.36
61.00	12.45	56.00	12.18
59.00	17.78	59.50	17.31
59.00	22.06	59.00	22.38
60.50	27.49	58.00	27.28
60.00	32.32	57.50	32.06
59.50	37.70	57.50	37.41
57.00	42.36	57.50	42.07
60.75	47.90	58.00	47.24
59.50	52.68	58.50	52.13
59.00	57.71	60.00	57.51
60.75	62.34	57.50	62.24
59.00	67.93	58.50	67.30
60.00	73.01	59.00	72.35
59.00	77.63	58.00	77.21
59.00	82.50	59.00	82.24
58.50	87.36	59.00	87.03

Prilog 6. Vrijednosti tvrdoće za epruvete ispitane u IWT, Bremen [3]

Epruvete 1 i 2	1 bar, 15 m/s, 950°C		1 bar, 15 m/s, 950°C	
	1-1	1-2	2-1	2-2
1.5	69.6	68.9	64.8	61.4
3	66.7	67.4	63.4	60.9
5	66.6	67	62.7	59.8
7	66.8	66.2	62.4	60
9	66.5	66.7	61.8	59.9
11	66.5	66.9	61.5	59.6
13	66.7	66.8	61.1	59.4
15	66.1	67.1	61	59.6
20	64.8	67	60.2	59.1
25	66	66.9	59.2	57.5
30	65.9	66.9	57.7	56.8
35	66	67.1	56.3	55.9
40	66	66.6	56	55.1
45	65.6	66.5	55.6	54.9
50	65.4	66.3	54.7	54.8
60	65.6	66.5	53.7	53.8
70	64.6	65.7	51.6	52

Prilog 7. Vrijednost vremena hlađenja u ovisnosti o udaljenosti od gašenog čela

Udaljenost od čela epruvete, mm	$t_{8-5}$ , s	$v_{hl}$ , °C/s
1.4	69.017	4.34676
2.8	76.16895	3.93861
7	95.4147	3.14417
15	121.794	2.46318
30	162.8595	1.84208
50	202.5353	1.48122
70	229.5383	1.30697