

TOPLINSKA OBRADA ŽILAVOG LIJEVA-ANALIZA PARAMETARA OBRADNE

Žuvan, Kristian

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split / Sveučilište u Splitu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:228:177714>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-06**



Repository / Repozitorij:

[Repository of University Department of Professional Studies](#)



SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Prijediplomski stručni studij Konstrukcijsko strojarstvo

KRISTIAN ŽUVAN

Z A V R Š N I R A D

**TOPLINSKA OBRADA ŽILAVOG LIJEVA – ANALIZA
PARAMETARA OBRADNE**

Split, lipanj 2023.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Prijediplomski stručni studij Konstrukcijsko strojarstvo

Predmet: Materijali II

Z A V R Š N I R A D

Kandidat: Kristian Žuvan

Naslov rada: Toplinska obrada žilavog lijeva–analiza parametara obrade

Mentor: Igor Gabrić v. pred.

Split, lipanj 2023.

REPUBLIKA HRVATSKA
SVEUČILIŠTE U SPLITU
Sveučilišni odjel za stručne studije

Studij: Konstrukcijsko strojarstvo
Predmet: Materijali II
Nastavnik: Igor Gabrić v. pred.

ZADATAK

Kandidat: Kristian Žuvan

Zadatak: Toplinska obrada žilavog lijeva – analiza parametara obrade

U radu je potrebno:

- Dati kratki uvod o vrstama toplinskih obrada koje se provode na žilavom lijevu
- Odabrati toplinsku obradu koja će se analizirati u nastavku rada
- Odrediti utjecajne faktore i analizirati dostupne podatke u literaturi za odabranu toplinsku obradu
- Planirati izvođenje pokusa primjenom kompozitnog plana (primjenom programa Design-Ekspert), odrediti faktore koji će varirati i odzivne veličine koje će biti mjerene (tvrdoća, čvrstoća. obradivost rezanjem i sl.)
- Dizajnirati epruvete, odrediti ishodno stanje materijala epruveta
- Provesti odabranu toplinsku obradu prema planu pokusa i izvršiti mjerenja na toplinski obrađenim epruvetama
- Rezultate mjerenja statički obraditi metodom analize varijance te prikazati tablično i grafički
- Iznijeti zaključke
- Navesti literaturu i izvore podataka

Sažetak

Tema ovog završnog rada je utjecaj toplinske obrade na mehanička svojstva žilavog lijeva. U radu su opisane najčešće korištene toplinske obrade koje se provode na žilavom lijevu, ali fokus je bio na toplinskoj obradi izotermičkog poboljšavanja. U teoretskom dijelu rada se navode općenita svojstva žilavog lijeva te utjecaj toplinske obrade izotermičkog poboljšavanja na mehanička svojstva žilavog lijeva.

U praktičnom dijelu rada izvršena su dva preliminarna pokusa kojim je izvršena kontrola raspoloživog žilavog lijeva čime je utvrđeno da se radi o nelegiranom žilavom lijevu EN-GJS-500. Na temelju utvrđenog materijala odabrana je toplinska obrada austempering (izotermičko poboljšavanje) s ciljem postizanja bajnitne strukture. Plan pokusa je generiran korištenjem centralnog kompozitnog plana. Nakon završetka toplinske obrade izvršeno je mjerenje tvrdoće epruveta nakon čega je izvršena statistička obrada podataka, a dobiveni rezultati su prikazani i komentirani u radu.

Ključne riječi: žilavi lijev, nodularni lijev, izotermičko poboljšavanje, austempering,

Summary (Thermal treatment of nodular iron - analysis of processing parameters)

The topic of this final thesis is the influence of heat treatment on the mechanical properties of ductile cast iron. The paper describes the most commonly used heat treatments that are conducted on ductile casting, but the focus was on isothermal heat treatment. In the theoretical part of the thesis, the general properties of ductile iron and the influence of isothermal heat treatment on the mechanical properties of ductile iron are stated.

In the practical part of the thesis, two preliminary experiments were carried out to control the available ductile iron, which determined that it was unalloyed ductile iron EN-GJS-400. On the basis of the determined material, heat treatment austempering (isothermal improvement) was chosen with the aim of achieving a bainitic structure. The test plan was generated using a central composite design. After heat treatment, the hardness of the test tubes was measured, and statistical processing of the data was performed. The obtained results were presented and commented in the paper.

Key words: ductile iron, nodular iron, isothermal improvement, austempering

Sadržaj

Sažetak	ii
Summary (Thermal treatment of nodular iron - analysis of processing parameters).....	ii
1. Uvod.....	1
1.1. Općenito o žilavom lijevu.....	1
1.2. Svojstva žilavog lijeva.....	2
1.3. Toplinska obrada žilavog lijeva.....	2
2. Karakteristike žilavog lijeva „en-gjs-500” odabranog za provedbu eksperimenata	8
2.1. Mehaničke karakteristike žilavog lijeva „en-gjs-400“	8
2.2. Kemijski sastav žilavog lijeva „en-gjs-500“	9
3. Eksperimentalni dio rada.....	10
3.1. Plan preliminarnih pokusa	10
3.2. Važni parametri izotermičke obrade.....	10
3.3. Odljevak za izradu epruveta	10
3.4. Prvi preliminarni pokus	11
3.5. Drugi preliminarni pokus.....	16
3.6. Generalno o izotermičkom poboljšavanju žilavog lijeva	18
4. Planiranje glavnog pokusa	19
5. Izvođenje glavnog pokusa.....	21
5.1. Epruvete.....	21
5.2. Toplinska obrada epruveta.....	22
5.3. Mjerenje tvrdoće.....	23
5.4. Provjera uređaja za mjerenje tvrdoće	28
6. Rezultati provedenog pokusa	29
7. Zaključak.....	40
Literatura	42

Popis slika

Slika 1.1 – Cijevi izrađene od žilavog lijeva [7]	1
Slika 1.2- Dijagram utjecaja temperature i vremena držanja na postotak popuštenog naprezanja [1]	3
Slika 1.3 - Kontinuirani ttt dijagram s ucrtanim krivuljama hlađenja za žarenje, normalizaciju i gašenje	4
Slika 1.4 - Dijagram klasičnog poboljšavanja čelika [1]	5
Slika 1.5 - Dijagram toplinske obrade sa ucrtanom krivuljom hlađenja za austempering[1]	6
Slika 1.6 - Primjer izotermičkog poboljšavanja žilavog lijeva [2].....	7
Slika 2. 1– Mehaničke karakteristike žilavog lijeva [3].....	8
Slika 3. 1- Odljevak žilavog lijeva za izradu epruveta.....	11
Slika 3.2 – Epruvete za prvi preliminarni pokus	12
Slika 3. 3- Peć s prikazanom temperaturom austenitizacije 950°C	12
Slika 3. 4 – Brušenje epruveta na planskoj brusilici	13
Slika 3. 5 – Uređaj za ispitivanje tvrdoće epruveta.....	13
Slika 3. 6 – Očekivani i stvarni rezultati tvrdoće epruveta	15
Slika 3. 7 – Analiza varijance model je beznačajan.....	16
Slika 3. 8 – Rezanje sirovca na tračnoj pili	17
Slika 3. 9 – Obrada epruveta na tokarilici.....	18
Slika 4. 1- Centralno kompozitni plan pokusa za odabrana dva parametra [4]	20
Slika 5. 1– Toplinski obrađene i označene epruvete pripremljene za mjerenje tvrdoće	21
Slika 5. 2 – Umetanje epruvete u peć za austenitizaciju	22
Slika 5. 3 – izotermička kupka (rastaljeno olovo).....	23
Slika 5. 4 – Izbor sile utiskivanja penetratora (30kp)	23
Slika 5. 5 – Podešavanje radnog stola	24
Slika 5. 6 – Pozicioniranje male kazaljke u pravilan položaj.....	24
Slika 5. 7 - Odbrojavanje vremena maksimalnog opterećenja.....	25
Slika 5. 8 – Smjer transliranja epruvete prema objektivu	25
Slika 5.9 – Epruveta u položaju za mjerenje otiska	26
Slika 5. 10 – Mjerna linija pri prvom očitavanju	26
Slika 5. 11– Mjerna linija pri drugom očitavanju	27
Slika 5. 12– Usporedna tablica različitih standarda za mjerenje tvrdoće [6].....	27

Slika 5. 13 – Etalon za provjeru točnosti mjernog uređaja	28
Slika 6. 1 – Odabir transformacije odzivne veličine [4]	31
Slika 6. 2 – Odabir modela matematičke funkcije [4].....	32
Slika 6. 3 - Dijagram izmjerenih vrijednosti tvrdoće i vrijednosti predviđenih matematičkim modelom [4]	33
Slika 6. 4 – 3d prikaz odstupanja predviđenih vrijednosti [4]	35
Slika 6.5 - Utjecaj temperature izotermičke kupke na tvrdoću uz konstantno trajanje austenitizacije od 15 minuta	36
Slika 6. 6 - Utjecaj temperature izotermičke kupke na tvrdoću uz konstantno trajanje austenitizacije od 60 minuta	36
Slika 6. 7 - Utjecaj trajanja austenitizacije na tvrdoću uz konstantnu temperaturu izotermičke kupke od 350 °c	37
Slika 6. 8 - Utjecaj trajanja austenitizacije na tvrdoću uz konstantnu temperaturu izotermičke kupke od 450 °c	37
Slika 6. 9 – Konturni dijagram ovisnosti tvrdoće po vickersu o parametrima toplinske obrade [4]	38
Slika 6. 10 – Konturni dijagram ovisnosti tvrdoće po rockwellu o parametrima toplinske obrade [4].....	39

Popis tablica

Tablica 2. 1– Minimalna vlačna čvrstoća i granica tečenja za žilavi lijev EN-GJS-500 [3]	8
Tablica 2. 2 - Kemijski sastav žilavog lijeva EN-GJS-500 [8]	9
Tablica 3. 1- Plan prvog preliminarnog pokusa kreiran uz pomoć računalnog programa Design Ekspert.....	14
Tablica 3. 2 – Rezultati mjerenja dobivene tvrdoće nakon provedene toplinske obrade – prvi preliminarni pokus	15
Tablica 3. 3 – Rezultati mjerenja tvrdoće nakon provedene toplinske obrade – drugi preliminarni pokus	17
Tablica 4. 1- Tablica sa zadanim parametrima toplinske obrade za svaku eprvetu [4]	19
Tablica 6. 1 – Hodogram i rezultati mjerenja [4]	29
Tablica 6. 2 – Rezultati mjerenja tvrdoće uzoraka nakon toplinske obrade	30
Tablica 6. 3 – Analiza značajnosti modela [4]	32
Tablica 6. 4 – Tablica vrijednosti izmjerenih tvrdoća i tvrdoća predviđenih matematičkim modelom [4]	34
Tablica 6. 5 – Matematička funkcija za određivanje odzivne vrijednosti tvrdoće [4]	34

1. UVOD

1.1. OPĆENITO O ŽILAVOM LIJEVU

Zbog uvijek prisutne potražnje za otpornim, čvrstim i ekonomski isplativim materijalom nastoji se od materijala lošijih mehaničkih svojstava dobiti materijal boljih mehaničkih svojstava. Jedan od takvih materijala je i žilavi (nodularni) lijev, koji nastaje dodavanjem magnezija u rastaljeno lijevano željezo. Proizvodnja žilavog lijeva na svjetskoj razini je u stalnom porastu, te je njegova upotreba značajna u automobilskoj industriji kao i za laka i teška gospodarska vozila.

Žilavi lijev prvi put je proizveden u SAD-u, a proizveo ga je američki inženjer metalurgije Keith Mills, koji je proces i patentirao 1949 godine.

Žilavi lijev je željezni lijev kod kojeg se uz dodatak magnezija ugljik kristalizira u obliku kuglica, što žilavom lijevu daje povoljna mehanička svojstva. Sadržaj ugljika u žilavom lijevu je od 3,2 % do 3,8 %. Mikrostruktura može biti : feritno-perlitna, feritna, perlitna, austenitna, martenzitna.



Slika 1.1 – Cijevi izrađene od žilavog lijeva [7]

1.2. SVOJSTVA ŽILAVOG LIJEVA

Karakteristična svojstva žilavog lijeva su:

- visoka rastezljivost
- dobra zavarljivost
- visoka dinamička izdržljivost
- visoka vlačna čvrstoća
- dobro se obrađuje postupkom odvajanja čestica
- otporan na udarce
- otporniji na koroziju od sivog lijeva
- niži troškovi proizvodnje u odnosu na čelični ljev
- odlična livljivost
- dobra površinska prokaljivost
- dobar omjer čvrstoće u odnosu na masu.

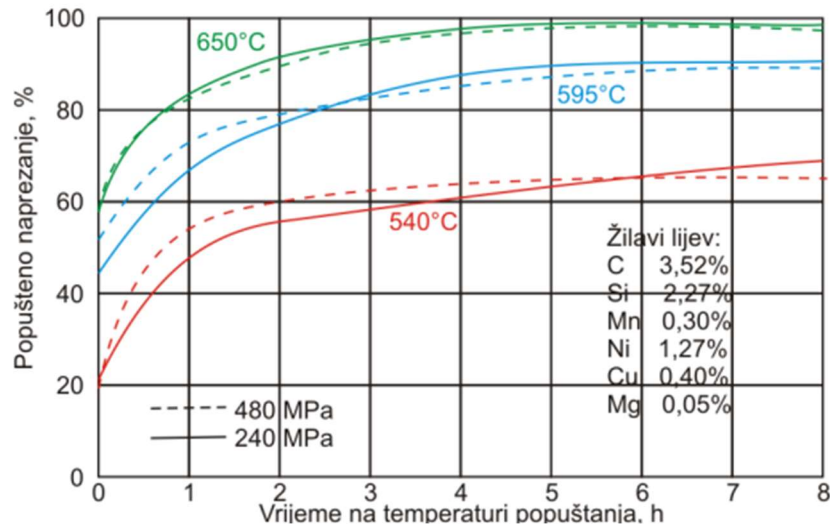
1.3 TOPLINSKA OBRADA ŽILAVOG LIJEVA

Toplinska obrada žilavog lijeva provodi se u cilju dobivanja mehaničkih svojstava koja nisu moguća samim lijevanjem.

Najvažniji procesi toplinske obrade žilavog lijeva su :

Žarenje za popuštanje napetosti (nisko-temperaturna obrada za smanjenje ili uklanjanje zaostalih napetosti)

Provodi se na složenim odljevcima iz žilavog lijeva, pri temperaturi od 510 do 675°C. Vrijeme držanja ovisi o složenosti i debljini odljevka, temperaturi držanja, te potrebnom stupnju popuštanja napetosti. Na slici 1.2 prikazan je utjecaj temperature i vremena držanja na postotak popuštenog naprezanja.



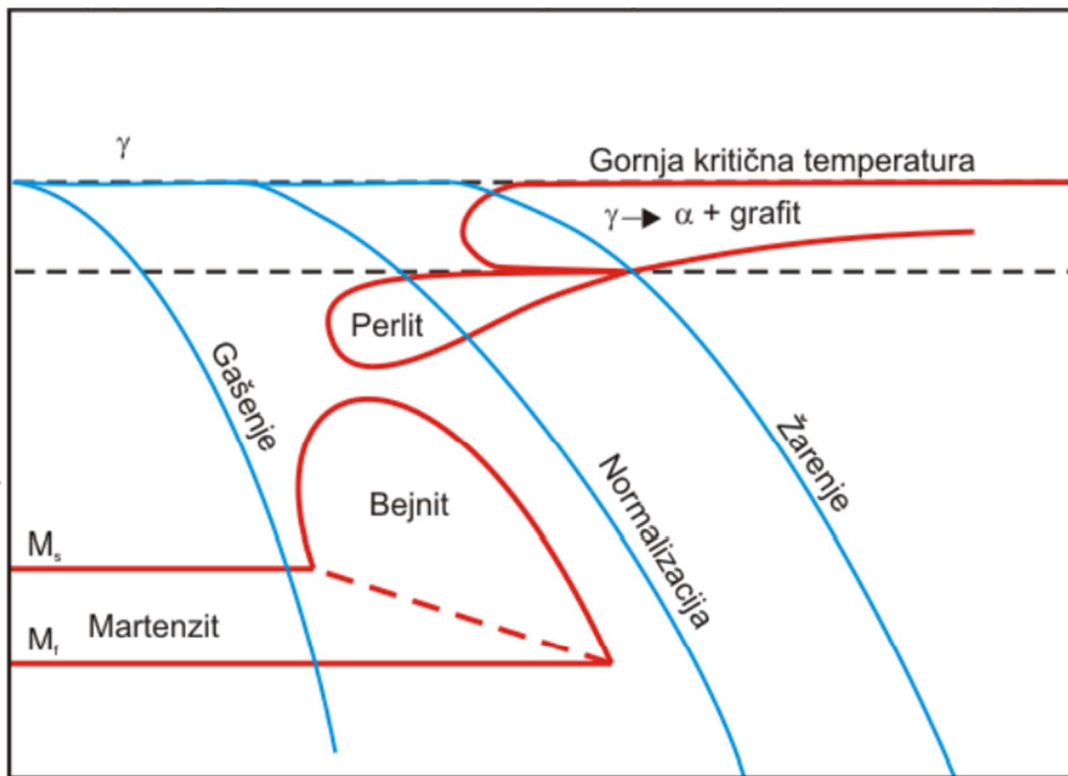
Slika 1.2- Dijagram utjecaja temperature i vremena držanja na postotak popuštenog naprezanja [1]

Žarenje

Žarenjem se dobije maksimalna rastezljivost i dobra obrada materijala rezanjem. Sam postupak žarenja ovisi o sastavu žarenog odljevka. Generalno se nastoji postići feritna mikrostruktura. Na slici 1.3 prikazan je kontinuirani TTT dijagram s ucrtanom krivuljom toplinske obrade žarenja.

Normalizacija (postizanje dobrog omjera između čvrstoće i rastezljivosti)

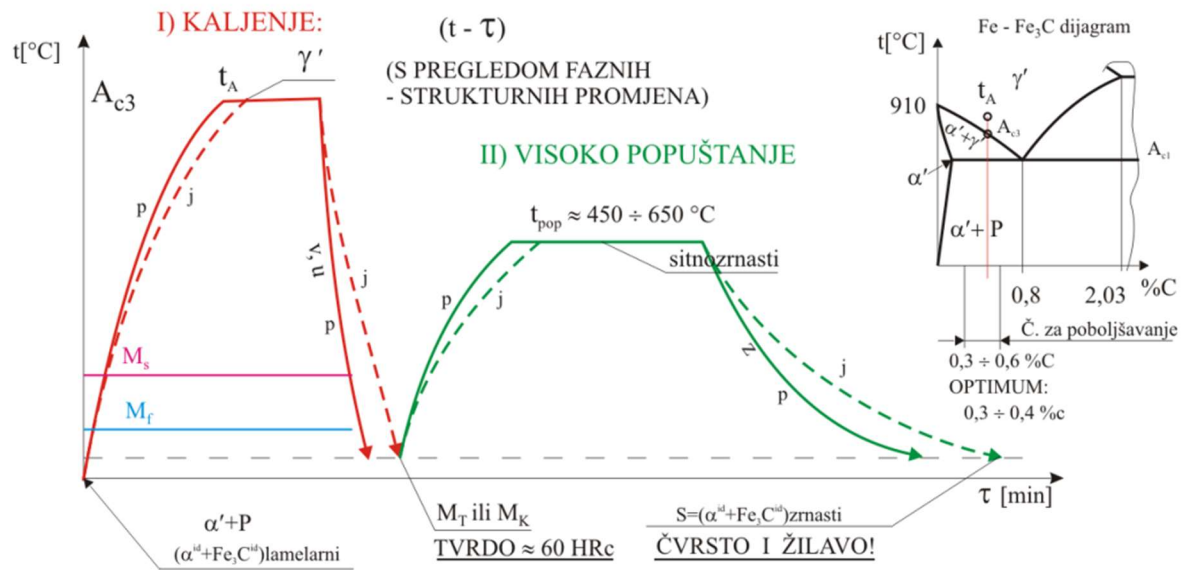
Provodi se potpunom austenitizacijom uz naknadno hlađenje na zraku. Moguće je veće povećanje vlačne čvrstoće. Homogena struktura nakon normalizacije načelno je fini perlit. Slika 1.3 prikazuje kontinuirani TTT dijagram s ucrtanom krivuljom hlađenja za normalizacijsko žarenje



Slika 1.3 - Kontinuirani TTT dijagram s ucrtanim krivuljama hlađenja za žarenje, normalizaciju i gašenje

Poboljšavanje (kaljenje i visoko temperaturno popuštanje)

Zagrijavanje na temperaturu austenitizacije od $845\div 925$ °C za potrebe kaljenja. Kaljenje se vrši u ulju temperature $80\div 100$ °C da bi se smanjila naprezanja, te spriječilo pucanje odljevka. Kod odljevaka jednostavnog oblika i manjih dimenzija presjeka može se koristiti i slana voda. Nakon kaljenja provodi se visoko temperaturno popuštanje na temperaturi između $425\div 600$ °C, u svrhu dobivanja zrnastog eutektoida. Nakon popuštanja slijedi sporo hlađenje za znatno smanjenje zaostalih naprezanja. Sama tvrdoća nakon popuštanja ovisi o sastavu materijala na startu, te tvrdoći materijala nakon kaljenja te temperaturi i vremenu popuštanja. Na slici 1.4 prikazan je dijagram klasične obrade poboljšavanja čelika



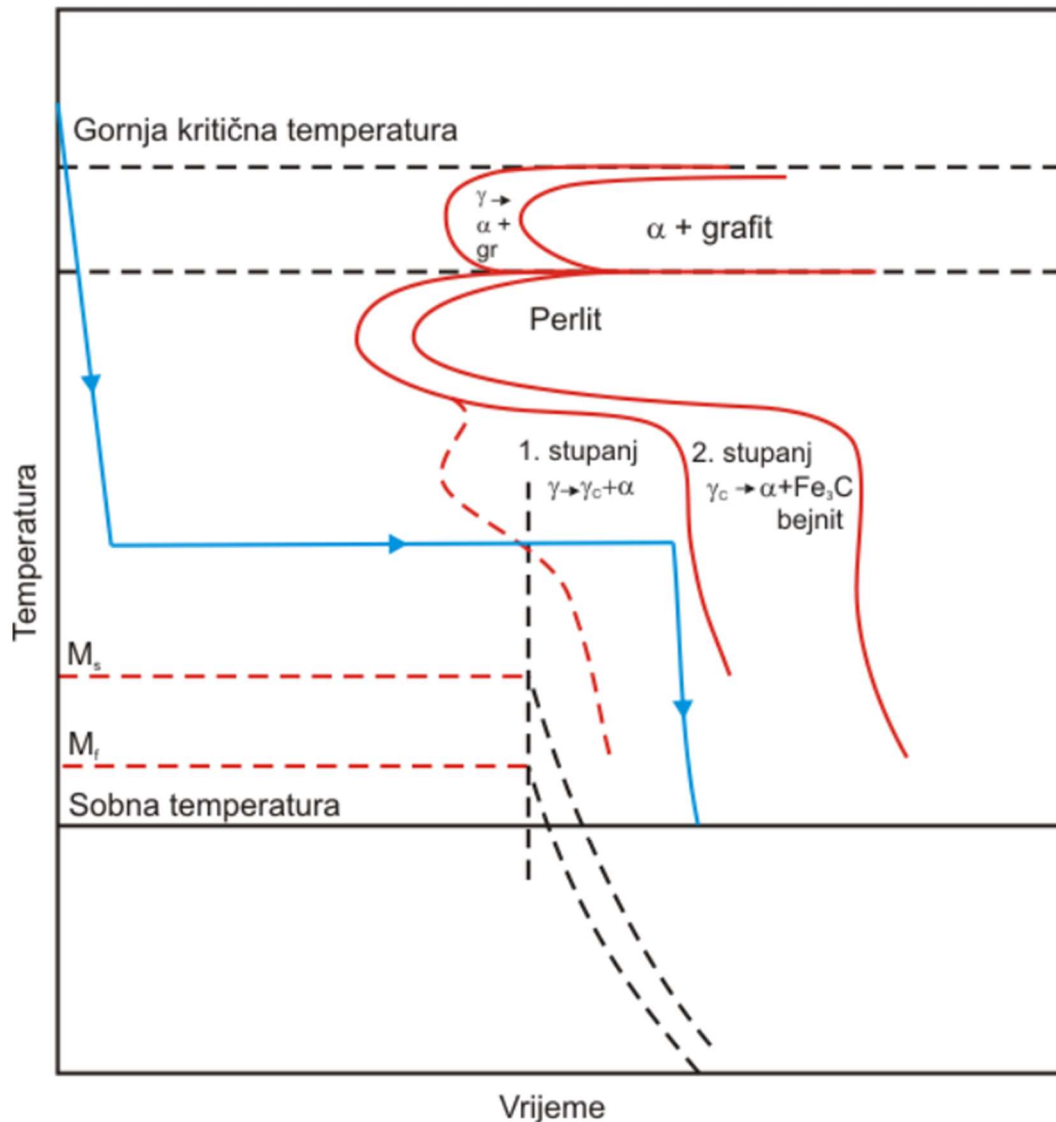
Slika 1.4 - Dijagram klasičnog poboljšavanja čelika [1]

Površinsko kaljenje (otvrdnjavanje površine za bolju otpornost na trošenje)

Provodi se zagrijavanjem na temperaturu austenitizacije te naglim hlađenjem. Poželjno je da matrica bude perlitna (najčešće se dobiva normalizacijom), koja nakon kaljenja postiže površinsku tvrdoću do 62 HRC. Na slici 1.3 prikazan je kontinuirani TTT dijagram s ucrtanom krivuljom gašenja.

Izotermičko poboljšavanje - austempering (postizanje visoke čvrstoće, otpornosti na trošenje te zadržavanje rastezljivosti)

Provodi se zagrijavanjem na temperaturu austenitizacije od $815 \div 925 \text{ } ^\circ\text{C}$, zadržavanjem na temperaturi austenitizacije, te hlađenjem u izotermičkoj kupci uz dovoljno dugom zadržavanju na izotermičkoj temperaturi kako bi se austenit što više obogatio ugljikom (čime se austenit stabilizira do sobne temperature- prvi stupanj pretvorbi, a opet da se izbjegne drugi stupanj pretvorbi tj., transformacija austenita u bajnit). Cilj je postizanje mikrostrukture acikularnog odnosno igličastog ausferita, tj. austenita bogatog ugljikom i ferita. Na slici 1.5 je prikazan dijagram s ucrtanom krivuljom hlađenja austempering toplinske obrade.



Slika 1.5 - Dijagram toplinske obrade sa ucrtanom krivuljom hlađenja za austempering[1]

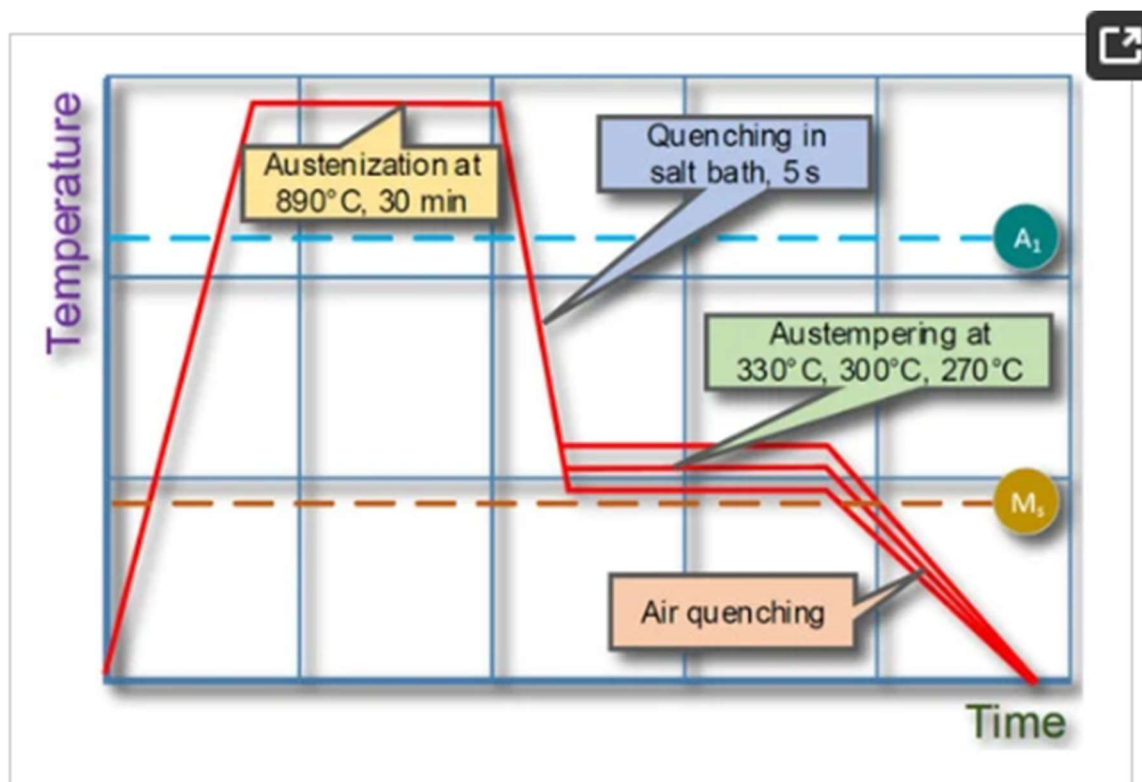
Tema ovog rada je toplinska obrada „izotermičko poboljšavanje (austempering)”. Svrha ove toplinske obrade je dobivanje mikrostrukture s poboljšanim mehaničkim svojstvima. Tako je izotermički poboljšani žilavi lijev dvostruko čvršći od perlitnog žilavog lijeva uz dobru rastezljivost i visoku udarnu žilavost.

Izotermičko poboljšavanje je toplinska obrada slična „klasičnom poboljšavanju” ali je za izotermičko poboljšavanje potreban manji utrošak energije (nije potrebno dvostruko zagrijavanje). Neke od prednosti izotermičke toplinske obrade u odnosu na klasično poboljšavanje su:

- Veća trajna dinamička čvrstoća
- Povećana otpornost na trošenje
- Veća granica razvlačenja
- Veća udarna žilavost

Sam proces izotermičkog poboljšavanja prikazan je na primjeru na slici 1.6 i sastoji se od:

1. zagrijavanje žilavog lijeva na temperaturu austenitizacije, (890 °C)
2. držanje na temperaturi austenitizacije do potpune austenitizacije (30 minuta)
3. hlađenje dovoljnom brzinom u solnoj kupki na temperaturu izotermičke pretvorbe (između 270 °C i 330 °C). Ohlađivanje s temperature austenitizacije do izotermičke temperature mora se izvršiti u roku od 5 sekundi, kako bi se dobio samo ausferit
4. držanje na izotermičkoj temperaturi do pretvorbe dovoljno dugo da se postigne visoki sadržaj ugljika u austenitu, ali ne predugo kako ne bi započela transformacija austenita u bajnit
5. sporo hlađenje na zraku do temperature okoline



Slika 1.6 - Primjer izotermičkog poboljšavanja žilavog lijeva [2]

2. KARAKTERISTIKE ŽILAVOG LIJEVA „EN-GJS-500” ODABRANOG ZA PROVEDBU EKSPERIMENATA

2.1. MEHANIČKE KARAKTERISTIKE ŽILAVOG LIJEVA „EN-GJS-500“

U svrhu provođenja eksperimenata odabran je žilavi lijev EN-GJS-500 (NL50 prema staroj HRN). U tablici 2.1 vidljiva je minimalna vlačna čvrstoća i granica tečenja navedenog žilavog lijeva. Na slici 2.1 prikazane su tipične karakteristike žilavog lijeva

Tablica 2. 1– Minimalna vlačna čvrstoća i granica tečenja za žilavi lijev EN-GJS-500 [3]

Oznaka materijala	Vlačna čvrstoća min, MPa	Granica tečenja min, MPa
EN-GJS-500	500	220

AS 1831/ISO 1083 Ductile Iron Typical Properties

Characteristic	Unit	Material designation									
		ISO1083/JS350-22	ISO1083/JS400-18	ISO1083/JS450-10	ISO1083/JS500-7	ISO1083/JS550-5	ISO1083/JS600-3	ISO1083/JS700-2	ISO1083/JS800-2	ISO1083/JS900-2	ISO1083/JS500-10
Shear strength	N/mm ²	315	380	405	450	500	540	630	720	810	nc ^b
Torsional strength	N/mm ²	315	380	405	450	500	540	630	720	810	nc ^b
Modulus of elasticity E (tension and compression)	GN/m ²	169	169	169	169	172	174	176	176	176	170
Poisson's ratio ν	—	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,28 to 0,29
Fatigue limit (Wöhler) ^d (rotating bending) unnotched ^a (φ 10,6 mm)	N/mm ²	180	185	210	224	236	248	280	304	304	225
Fatigue limit (Wöhler) ^d (rotating bending) notched ^a (φ 10,6 mm)	N/mm ²	114	122	128	134	142	149	168	182	182	140
Compression strength	N/mm ²	—	700	700	800	840	870	1 000	1 150	—	nc ^b
Fracture toughness K _{IC}	MPa·√m	31	30	28	25	22	20	15	14	14	28
Thermal conductivity at 300 °C	W/(K·m)	38,2	36,2	36,2	35,2	34	32,5	31,1	31,1	31,1	nc ^b
Specific heat capacity 20 °C to 500 °C	J/(kg·K)	515	515	515	515	515	515	515	515	515	nc ^b
Linear expansion coefficient 20 °C to 400 °C	μm/(m·K)	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	nc ^b
Density	kg/dm ³	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,2	7,2	7,2	7,2	7,1
Maximum permeability	μH/m	2 136	2 136	2 136	1 596	1 200	868	501	501	501	nc ^b
Hysteresis loss (B = 1T)	J/m ³	600	600	600	1 345	1 800	2 248	2 700	2 700	2 700	nc ^b
Resistivity	μΩ·m	0,50	0,50	0,50	0,51	0,52	0,53	0,54	0,54	0,54	nc ^b
Predominant structure		ferrite	ferrite	ferrite	ferrite-pearlite	ferrite-pearlite	pearlite-ferrite	pearlite	pearlite or tempered martensite	tempered martensite ^{f, g}	ferrite

NOTE 1 The notched test pieces are illustrated in [6] and [7], see bibliography.
NOTE 2 1 N/mm² = 1 MPa.
NOTE 3 Unless otherwise specified, the values given in this Table come from measurements at room temperature.

^a For details, see [5].
^b Not determined.
^c Fatigue limit test pieces.
^d Unnotched – In annealed ferritic spheroidal graphite cast iron the fatigue limit is about 0,5 × tensile strength in spheroidal graphite cast iron with a tensile strength of 370 N/mm². The ratio decreases with increase in tensile strength until, in pearlitic and quenched and tempered spheroidal graphite cast iron, the fatigue limit is approximately 0,4 × tensile strength. The ratio decreases further when tensile strength exceeds 740 N/mm².
^e Notched – For a test piece of 10,6 mm diameter at notch with a circumferential 45° V-notch having a radius of 0,25 mm, the fatigue limit of annealed spheroidal graphite cast iron decreases to a value of about 0,63 × fatigue limit of unnotched test pieces in spheroidal graphite cast iron with a tensile strength of 370 N/mm². This figure decreases as the tensile strength of a ferritic spheroidal graphite cast iron increases. In spheroidal graphite cast iron with intermediate strengths and in pearlitic spheroidal graphite cast iron and quenched and tempered spheroidal graphite cast iron, the fatigue limit of notched test pieces is approximately 0,6 × the fatigue limit of unnotched test pieces.
^f For large castings, it can also be pearlite.
^g Or bainite-susferrite

Slika 2. 1– Mehaničke karakteristike žilavog lijeva [3]

2.2. KEMIJSKI SASTAV ŽILAVOG LIJEVA „EN-GJS-500“

U tablici 2.2 prikazan je tipični kemijski sastav žilavog lijeva EN-GJS-500.

Tablica 2. 2 - Kemijski sastav žilavog lijeva EN-GJS-500 [8]

Element	C	Si	Mn	P	S	Mg
Udio[%]	2.7-3.7	0.8-2.9	0.3-0.7	≤ 0.1	≤0.02	0.04

Variranjem kemijskih elemenata iz ove tablice postižu se različita mehanička svojstva žilavog lijeva. U praksi svaki proizvođač žilavog lijeva može varirati sastav žilavog lijeva ovisno o uvjetima proizvodnje te prethodnom iskustvu. Uvjet je da se moraju zadovoljiti propisana mehanička svojstva materijala.

3. EKSPERIMENTALNI DIO RADA

3.1. PLAN PRELIMINARNIH POKUSA

Prvo će se provesti preliminarni pokusi u svrhu utvrđivanja da li odabrani nodularni lijev udovoljava zahtjevima planirane toplinske obrade. Nakon toga pristupit će se glavnom dijelu pokusa, odnosno toplinskoj obradi epruveta u svrhu dobivanja ADI (ausferrite nodular iron). Zatim će se mjeriti tvrdoća uzoraka u svrhu utvrđivanja faznog stanja epruveta nakon toplinske obrade.

Plan pokusa će se generirati uz pomoć računalnog programa Design-ekspert. Uz pomoć ovog računalnog programa dobiti će se matematički model uz najmanji potreban broj pokusa.

3.2. VAŽNI PARAMETRI IZOTERMIČKE OBRADÉ

Uz sam materijal važni faktori izotermičke obrade su :

- Veličina uzorka
- Temperatura austenitizacije (t_A)
- Vrijeme držanja na temperaturi austenitizacije ($\Delta\tau_A$)
- temperatura i sastav izotermičke kupke (t_{IZ})
- vrijeme držanja u izotermičkoj kupci ($\Delta\tau_{IZ}$)

3.3. ODLJEVAK ZA IZRADU EPRUVETA

Na slici 3.1 prikazan je sirovac žilavog lijeva iz kojeg su izrađene epruvete za provedbu pokusa.



Slika 3. 1- Odljevak žilavog lijeva za izradu epruveta

3.4. PRVI PRELIMINARNI POKUS

U prvom preliminarnom pokusu pokušalo se utvrditi da li se epruvete koje su već toplinski obrađene u prijašnjem pokusu mogu ponovno iskoristiti. Prvi preliminarni pokus provodi se na način da se pet epruveta jednakih dimenzija širine 25 mm i debljine 10 mm prikazano na slici 3.2 zagrijavaju u peći na jednaku temperaturu austenitizacije od 950 °C uz variranje duljine držanja na temperaturi austenitizacije prikazano na slici 3.3, potom drže u olovnoj kupci izotermičke temperature 390 °C u trajanju od 60 minuta, te sporo hlade na zraku. Nakon toga pristupa se brušenju epruveta na planskoj brusilici s magnetnim radnim stolom prikazano na slici 3.4, te mjerenju tvrdoće epruveta po Vickersu (HV30) na uređaju za mjerenje tvrdoće prikazano na slici 3.5.

Plan pokusa generiran je uz pomoć računalnog programa Design-ekspert. Tablica 3.1 prikazuje plan prvog preliminarnog pokusa.



Slika 3.2 – Epruvete za prvi preliminarni pokus



Slika 3. 3- Peć s prikazanom temperaturom austenitizacije 950°C



Slika 3. 4 – Brušenje epruveta na planskoj brusilici



Slika 3. 5 – Uređaj za ispitivanje tvrdoće epruveta

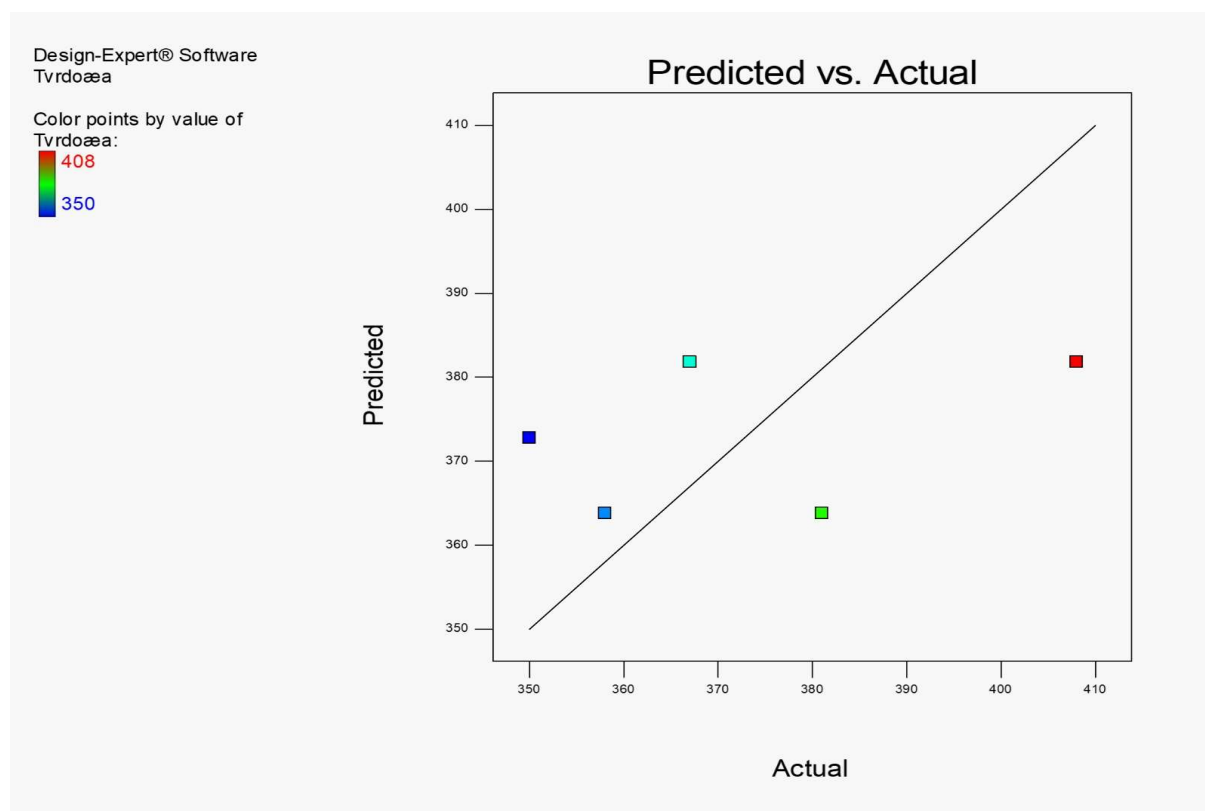
Tablica 3. 1- Plan prvog preliminarnog pokusa kreiran uz pomoć računalnog programa Design Ekspert

Broj uzorka	Broj pokusa	Faktor 1 Vrijeme držanja na temperaturi austenitizacije (950 °C)
1	3	10
2	1	10
3	2	60
4	4	60
5	5	35

Nakon provedenog pokusa dobiveni su rezultati koji nisu očekivani obzirom na pretpostavljeni sastav žilavog lijeva (tablica 3.2), što ukazuje da je ishodna struktura, fazni sastav i tvrdoća su različiti od očekivanog i predviđenog računalnim programom prikazanim na slici 3.6. Teoretski rezultati dobiveni su modelom u računalnom programu a stvarni mjerenjem tvrdoće. Kada se analizirao model varijance došlo se do rezultata da je model beznačajan, što je prikazano na slici 3.7. Ovo je dovelo do zaključka da su epruvete korištene u ovom pokusu neupotrebljive zbog prije provedene toplinske obrade. Zbog toga se odlučilo provesti drugi preliminarni pokus, uz izradu novih epruveta od sirovca istog žilavog lijeva, a koje nisu prethodno toplinski obrađene.

Tablica 3. 2 – Rezultati mjerenja dobivene tvrdoće nakon provedene toplinske obrade – prvi preliminarni pokus

Broj uzorka	Broj pokusa	Faktor 1 Vrijeme držanja na temperaturi austenitizacije (950 °C)	Odziv 1 Tvrdoća HV30
1	3	10	381
2	1	10	358
3	2	60	408
4	4	60	367
5	5	35	350



Slika 3. 6 – Očekivani i stvarni rezultati tvrdoće epruveta

Response 1	Tvrdoća					
ANOVA for Response Surface Linear model						
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	324,00	1	324,00	0,55	0,5107	not significant
<i>A-Vrijeme dr.</i>	324,00	1	324,00	0,55	0,5107	
Residual	1754,80	3	584,93			
<i>Lack of Fit</i>	649,80	1	649,80	1,18	0,3915	not significant
<i>Pure Error</i>	1105,00	2	552,50			
Cor Total	2078,80	4				

Slika 3. 7 – Analiza varijance model je beznačajan

3.5. DRUGI PRELIMINARNI POKUS

Drugim preliminarnim pokusom u prvom redu provjerava se da li je raspoloživi nodularni lijev pogodan za postizanje željene ausferitne strukture.

Pokus se provodi na način da se iz sirovca tračnom pilom prikazano na slici 3,8, režu uzdužne kvadratne trake, te se zatim obradom na tokarilici prikazano na slici 3.9, finaliziraju okrugle epruvete širine 20 mm i visine 10 mm . Dvije epruvete su ubačene u peć na temperaturu austenitizacije od 900 °C i držanje na toj temperaturi u vremenu od dvadeset minuta. Nakon toga epruvete su izotermički hladene u olovnoj kupci na temperaturi od 360 °C u trajanju od pet minuta. Nakon što su epruvete izvađene iz olovne kupke, jedna je naglo ohlađena u hladnoj vodi, a druga sporo hladena na zraku. Nakon što su obje epruvete ohlađene pristupilo se površinskom brušenju na planskoj brusilici te mjerenju tvrdoće po Rockwell-u. Rezultati dobivene tvrdoće prikazani su u tablici 3.3.

Tablica 3. 3 – Rezultati mjerenja tvrdoće nakon provedene toplinske obrade – drugi preliminarni pokus

Mjerenje tvrdoće HRC 150 [kp]	1	2	3	4	5
Epruveta 1 Hlađenje u hladnoj vodi	36.5	37	36	36	37
Epruveta 2 Hlađenje na zraku	36	35	36	36,5	36



Slika 3. 8 – Rezanje sirovca na tračnoj pili

Na temelju pokusa vidljivo je da je uzorak hlađen u hladnoj vodi nakon kratkog izotermičkog hlađenja ima približno jednaku tvrdoću kao i uzorak koji sporo hlađen na zraku nakon kratkog izotermičkog hlađenja. Ovo navodi na zaključak da je sva pretvorba već završena, inače bi uzorak hlađen u vodi imao značajno veću tvrdoću, a uzrok tome bi bila pretvorba austenita u martenzit.

Na temelju završene transformacije u tako kratkom vremenskom intervalu zaključuje se da se radi o nelegiranom nodularnom lijevu kojeg nije moguće toplinski obraditi u svrhu dobivanja ausferitne strukture. Iz ovog razloga odlučilo se preći na analizu toplinske obrade izotermičko

poboljšavanje nelegiranog nodularnog lijeva. Proces toplinske obrade nodularnog lijeva generalno je opisan u poglavlju 4.3.



Slika 3. 9 – Obrada epruveta na tokarilici

3.6. GENERALNO O IZOTERMIČKOM POBOLJŠAVANJU ŽILAVOG LIJEVA

Ovdje se navode osnovne smjernice za izotermičko poboljšavanje žilavog lijeva.

Izotermičko poboljšavanje je postupak toplinske obrade koji se sastoji od ugrijavanja na temperaturu austenitizacije (900 °C) i brzog hlađenja do temperature izotermičke pretvorbe obično 300 do 400 °C u olovnoj kupci i držanja na toj temperaturi, dok se potpuno ne završi pretvorba u bajnit. Ohlađivanje teče sporo na zraku.

4. PLANIRANJE GLAVNOG POKUSA

Uvidom u mehaničke karakteristike materijala izvršeno je planiranje pokusa samog pokusa.

Planiranje pokusa izvršeno je primjenom programa „Design-Ekspert 13“ u kojem se koristio centralni kompozitni plana pokusa.

Kako bi se generirao plan pokusa u navedenom programu potrebno je definirati parametre i odzivnu veličinu.

Odabrani parametri su vrijeme držanja na temperaturi austenitizacije t_A u °C i temperatura izotermičke kupke t_{IZ} u °C, a odzivna veličina je tvrdoća po Vickersu (HV30). Vickersova metoda odabrana je zbog mogućnosti mjerenja tvrdoće tvrdih i srednje tvrdih materijala.

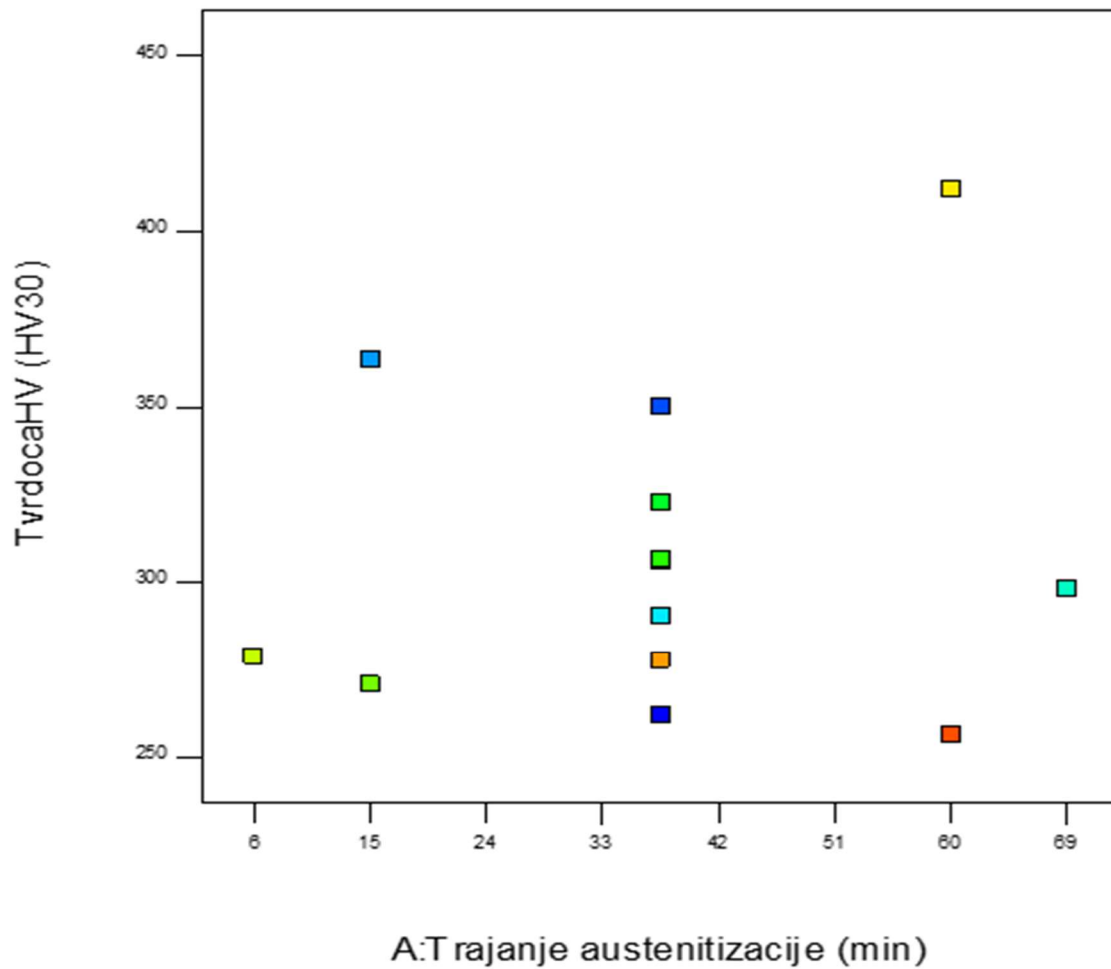
Uzimajući u obzir parametre i odzivnu veličinu program je generirao 13 stanja pokusa za koje je potrebno pripremiti 13 epruveta (tablica 4.1).

Tablica 4. 1-Tablica sa zadanim parametrima toplinske obrade za svaku epruvetu [4]

	Std	Run	Factor 1 A:Trajanje austenitizac... min	Factor 2 B:Izotermicka temperat... C
	7	1	37,5	450
	8	2	37,5	340
	1	3	15	345
	9	4	37,5	400
	6	5	69,3198	398
	10	6	37,5	400
	12	7	37,5	400
	11	8	37,5	395
	3	9	15	450
	5	10	5,68019	400
	2	11	60	350
	13	12	37,5	400
	4	13	60	450

Svrha ovog plana pokusa je dobiti matematički model koji opisuje proces. Ako su proučavani faktori u pokusu doista oni koji utječu na proces, a podaci dobiveni pokusom prihvatljive točnosti, tada je moguće razviti matematički model koji vjerodostojno opisuje proces. Slika 4.1 prikazuje dijagram s centralnim kompozitnim planom za definirane parametre i raspone

vrijednosti. Sa apscise i ordinate mogu se, za svaku epruvetu, očitati odgovarajući parametri. U centralnom dijelu dijagrama vidljivo je 6 točaka s istim vremenom držanja na temperaturi austenitizacije, kako je to na slici 4.1 naznačeno.



Slika 4. 1- Centralno kompozitni plan pokusa za odabrana dva parametra [4]

5. IZVOĐENJE GLAVNOG POKUSA

Kad se odredio materijal, temperatura austenitizacije i generirao plan pokusa pristupilo se njegovoj realizaciji.

Cilj pokusa je analizirati kakav utjecaj imaju parametri vrijeme držanja na fiksnoj temperaturi austenitizacije i varijacija temperature izotermičke kupke uz fiksno vrijeme držanja na tvrdoću epruveta.

5.1. EPRUVETE

Za provedbu ovog pokusa potrebno je 13 epruveta. Proces dobivanja epruveta opisan je u poglavlju „4.2“ ovog rada. Nakon brušenja i hlađenja epruveta iste su označene velikim slovima, od slova A do slova M, prikazano na slici 5.1. Mjerenje tvrdoće epruvete izvršeno je na suprotnoj strani od slovne oznake.



Slika 5. 1– Toplinski obrađene i označene epruvete pripremljene za mjerenje tvrdoće

5.2. TOPLINSKA OBRADA EPRUVETA

Toplinska obrada epruveta vršila se na način da su se epruvete u peći (slika 5.2) zagrijavale na temperaturu austenitizacije od 900 °C uz varijaciju vremena držanja na toj temperaturi, zatim izotermički hladile u olovnoj kupci (slika 5.3), uz varijaciju temperature između 350 i 460 °C i fiksnog vremena držanja u trajanju od pet minuta. Nakon toga epruvete su hladene na mirnom zraku.



Slika 5. 2 – Umetanje epruvete u peć za austenitizaciju

Nakon hlađenja epruveta, iste su površinski obrušene na planskoj brusilici svrhu odstranjivanja kontaminiranog površinskog sloja (razugljičenog i oksidiranog). s obje strane. Brušenje s obje strane potrebno je iz razloga jer se s jedne strane moraju vidjeti slova potrebna za redosljed izvođenja pokusa, a suprotna strana brušena je zbog toga što će se koristiti za utiskivanje penetratora uređaja za mjerenje tvrdoće.



Slika 5. 3 – Izotermička kupka (rastaljeno olovo)

5.3. MJERENJE TVRDOĆE

Tvrdoća se mjerila ispitivanjem po Vickers-u. Ova metoda služi za mjerenje tvrdoće tvrdih i srednje mekih materijala, a penetrator je četverostrana dijamentna piramida vršnog kuta od 136° . Tvrdoća se dobije iz omjera standardne sile F površine otiska A [5].

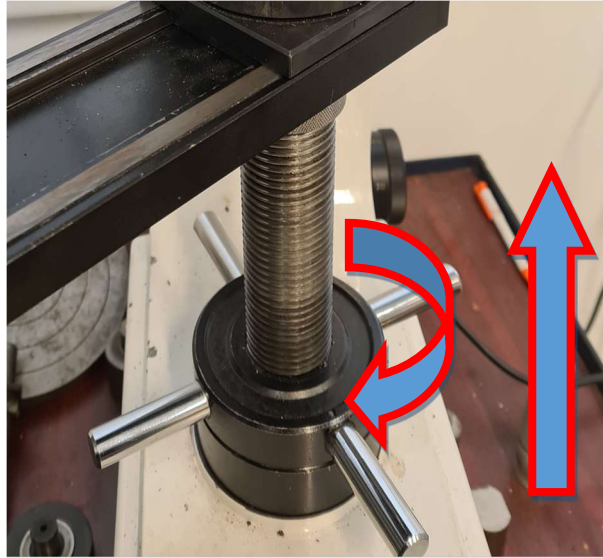
$$HV = F / A$$

Da bi se moglo početi s mjerenjem tvrdoće prvi korak je učvršćivanje penetratora u nosač uređaja za mjerenje i izbor standardne sile utiskivanja koja za ovaj slučaj iznosi $F = 300 \text{ N}$, a što je prikazano na slici 5.4



Slika 5. 4 – Izbor sile utiskivanja penetratora (30kp)

Drugi korak pri mjerenju je podešavanje visine između epruvete i penetratora koje se vrši okretanjem matice oko navojnog vretena (slika 5.5), imajući u vidu da se pri samom dodiru između penetratora i epruvete smanji sila pritezanja matice da ne bi došlo do loma penetratora. Ova sila dodira između penetratora i epruvete određuje se pomoću male kazaljke na zaslonu mjernog uređaja koja mora biti u pravilnom položaju (prikazano na slici 5.6).

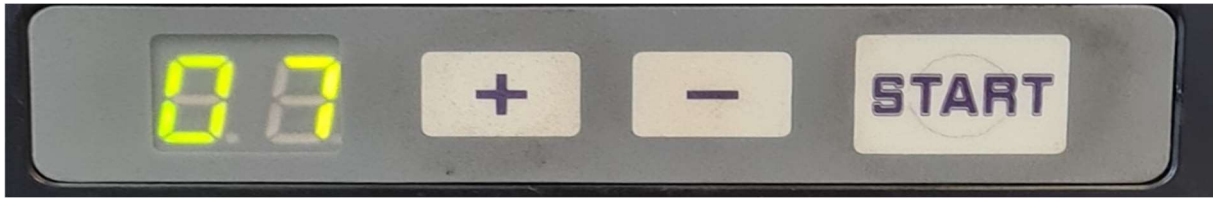


Slika 5. 5 – Podešavanje radnog stola



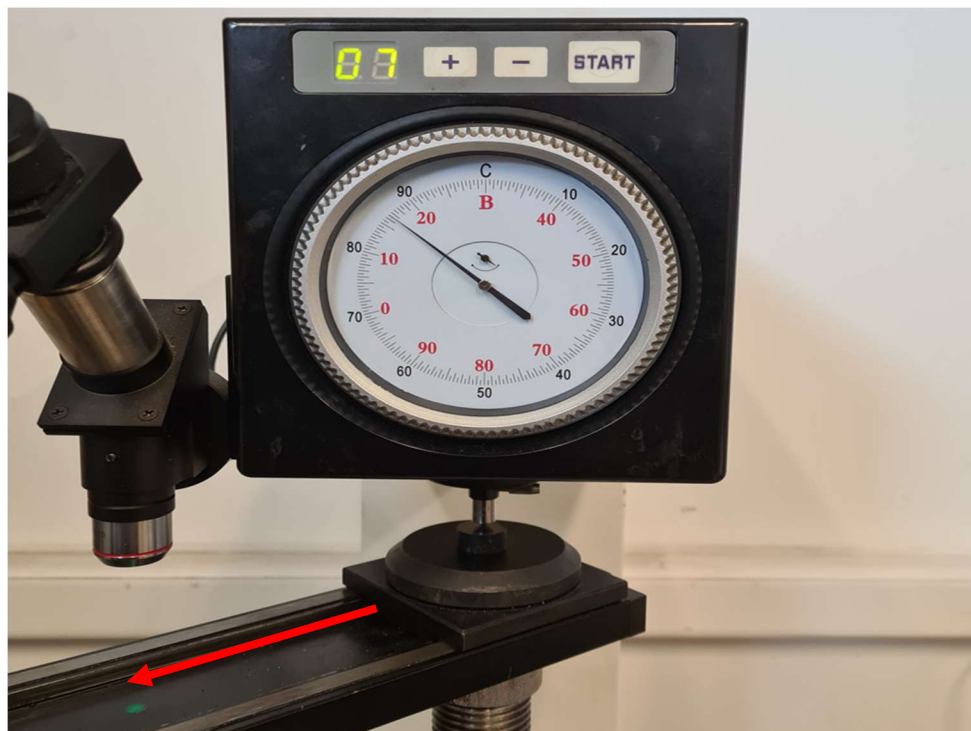
Slika 5. 6 – Pozicioniranje male kazaljke u pravilan položaj

Treći korak je određivanje duljine trajanja maksimalnog opterećenja na epruvetu u sekundama koje je u ovom slučaju iznosilo deset sekundi prikazano na slici 5.7 (na slici je prikazano vrijeme od sedam sekundi u trenutku odbrojavanja prilikom samog mjerenja).

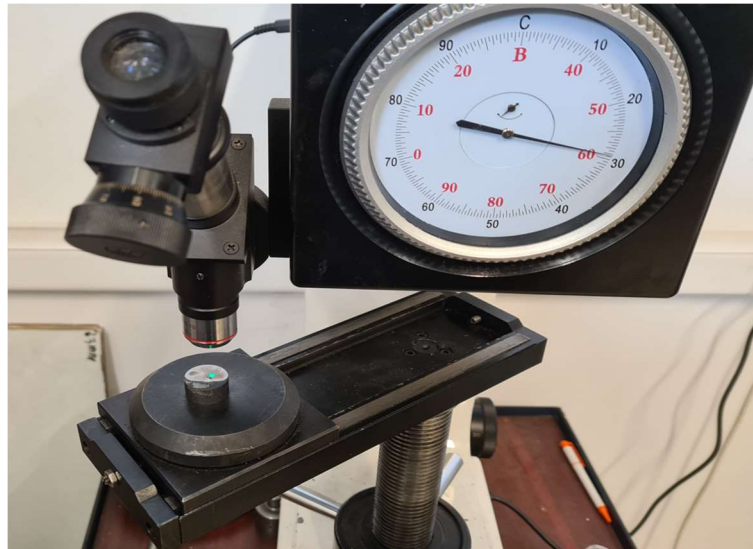


Slika 5. 7 - Odbrojavanje vremena maksimalnog opterećenja

Nakon odbrojavanja vremena maksimalnog opterećenja uređaj se oglašava zvučnim signalom i automatski vrši rasterećenje, potom se uz pomoć matice spušta radni stol kako bi se epruvetu pomoću klizača moglo translirati ispod objektiva za mjerenje duljine otiska (slike 5.8 i 5.9).



Slika 5. 8 – Smjer transliranja epruvete prema objektivu

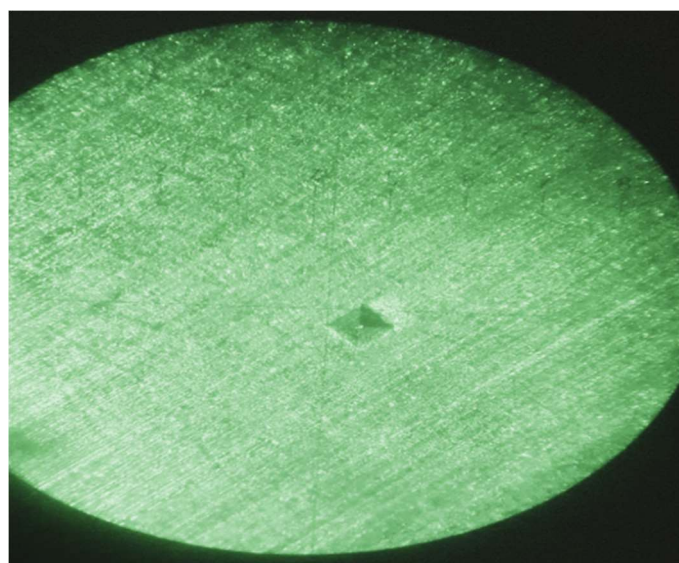


Slika 5.9 – Epruveta u položaju za mjerenje otiska

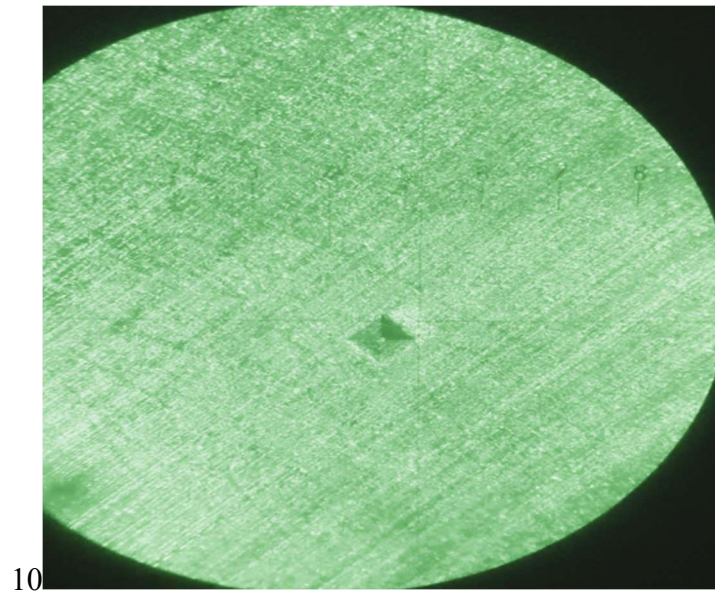
Da bi se izmjerilo duljinu otiska potrebno je izoštriti sliku u objektivu uređaja za mjerenje, a to se vrši na način da se korigira udaljenost radnog stola od objektiva. Zatim se pomoću noniusa pomiče mjernu liniju za mjerenje kako bi istu doveli do početnog položaja za mjerenje (Slika 5.10), nakon toga se očita veća vrijednost mjerne skale. Zatim se noniusom pomiče linija na drugu stranu otiska (Slika 5.11) i očita druga vrijednost. Dobivene vrijednosti zatim se uvrštavaju u formulu :

$$d = (\text{Veća vrijednost} - \text{Manja vrijednost}) \cdot 0.002$$

gdje je 0.002 – konstanta vezana za povećanje objektiva mikroskopa

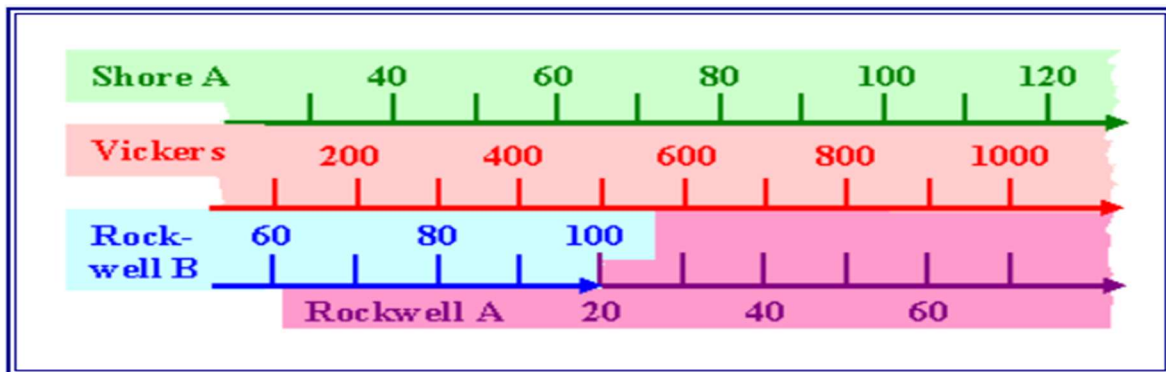


Slika 5. 10 – Mjerna linija pri prvom očitavanju



Slika 5. 11– Mjerna linija pri drugom očitaju

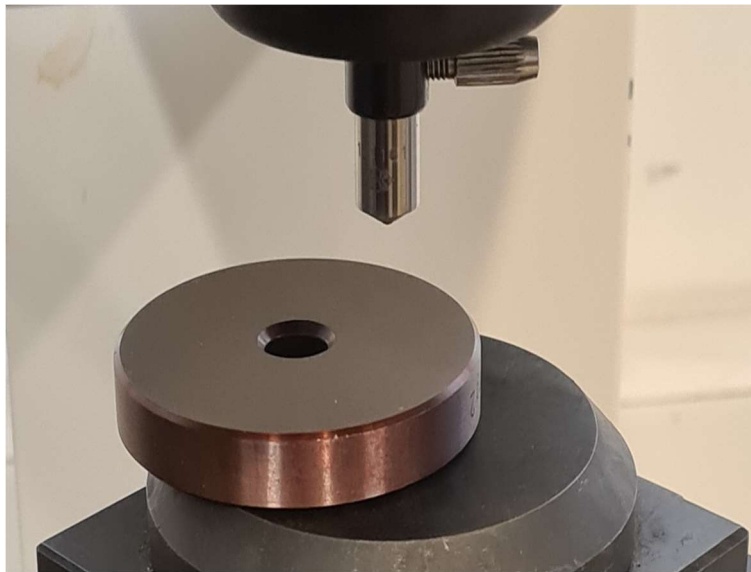
Dobiveni rezultat uspoređuje se s tablicama za mjerenje tvrdoće po Vickersu, te se dolazi do tvrdoće epruvete. Na slici 5.12 prikazana je usporedna tablica vrijednosti različitih standarda za mjerenje tvrdoće.



Slika 5. 12– Usporedna tablica različitih standarda za mjerenje tvrdoće [6]

5.4. PROVJERA UREĐAJA ZA MJERENJE TVRDOĆE

Prije pristupanja mjerenju tvrdoće epruveta nakon pokusa vrši se provjera uređaja za mjerenje tvrdoće. Provjera se vrši na način da se izvrši probno mjerenje etalona poznate tvrdoće od 444 Vickersa. Dobiveni rezultati su u okviru pogreške $1 \div 2$ %, što su rezultati koji zadovoljavaju potrebe ovog pokusa. Na slici 5.13 prikazan je etalon za provjeru točnosti mjernog uređaja.



Slika 5. 13 – Etalon za provjeru točnosti mjernog uređaja

6. REZULTATI PROVEDENOG POKUSA

Nakon provedenog pokusa dobiveni rezultati statistički su obrađeni programom „Design Expert 13“ koji je ujedno korišten i za izradu matematičkog modela pokusa.

Hodogram izvođenja pokusa i dobiveni srednji rezultati tvrdoća nalaze se u tablici 6.1. Sami rezultati prikazani su u dva stupca na desnoj strani tablice u dva standarda za mjerenje tvrdoće (po Vickersu i po Rockwellu). U tablici 6.2 prikazani su rezultati za pet mjerenja tvrdoće po svakom uzorku.

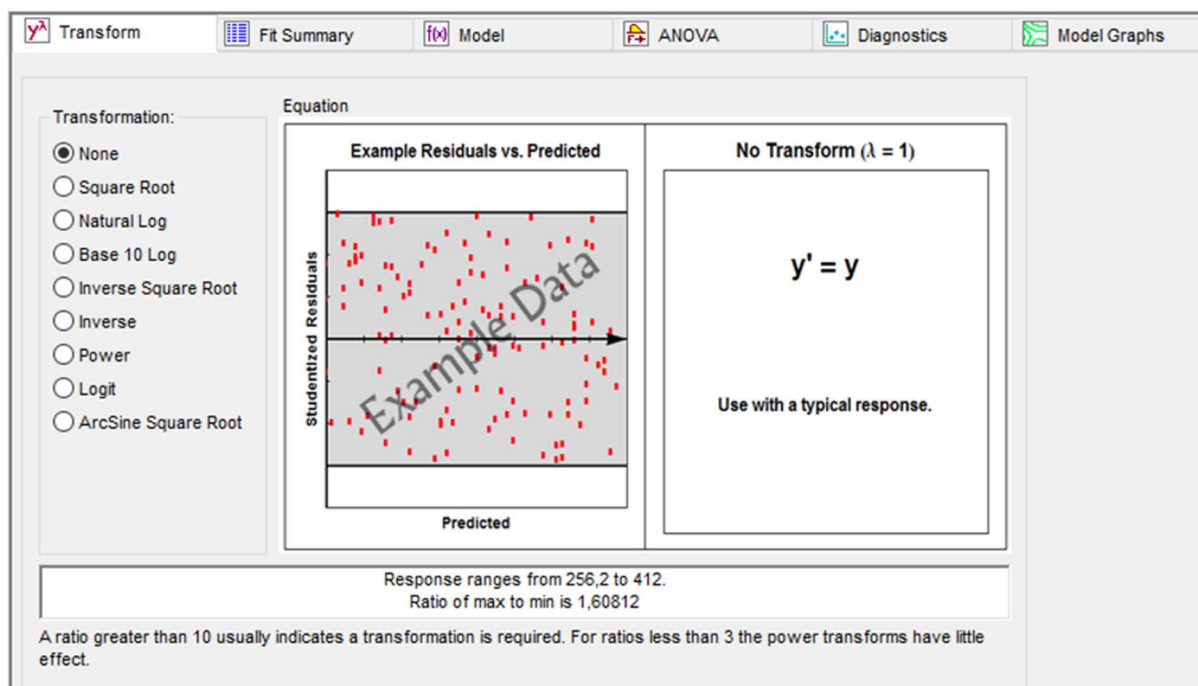
Tablica 6. 1 – Hodogram i rezultati mjerenja [4]

Std	Run	Faktor 1	Faktor 2	Odziv 1	Odziv 2
		A:Trajanje austenitizacije	B:Izotermicka temperatura	Tvrdoća HV30	Tvrdoća HRC
		min	C	HV30	HRC
1	3	15	345	363,6	38
2	11	60	350	412	43
3	9	15	450	270,8	26
4	13	60	450	256,2	24
5	10	6	400	278,8	27
6	5	69	398	298,4	30
7	1	37,5	450	262	25
8	2	37,5	340	350,2	36
9	4	37,5	400	290,6	29
10	6	37,5	400	306	31
11	8	37,5	395	306,6	31
12	7	37,5	400	322,8	33
13	12	37,5	400	277,8	27

Tablica 6. 2 – Rezultati mjerenja tvrdoće uzoraka nakon toplinske obrade

TVRDOĆA PO VICKERSU (HV30)							
	UZORAK	MJERENJE 1	MJERENJE 2	MJERENJE 3	MJERENJE 4	MJERENJE 5	SREDNJA VRIJ. HV
1.	A	370	385	331	381	351	363.6
2.	B	434	411	415	402	398	412
3.	C	280	280	263	261	270	270.8
4.	D	236	249	261	263	272	256.2
5.	E	287	272	272	293	270	278.8
6.	F	298	307	290	315	282	298.4
7.	G	258	256	263	258	275	262
8.	H	334	344	348	355	370	350.2
9.	I	298	285	270	285	315	290.6
10.	J	301	304	304	312	309	306.6
11.	K	304	304	304	312	309	306.6
12.	L	334	325	309	325	321	322.8
13.	M	290	275	293	277	254	277.8

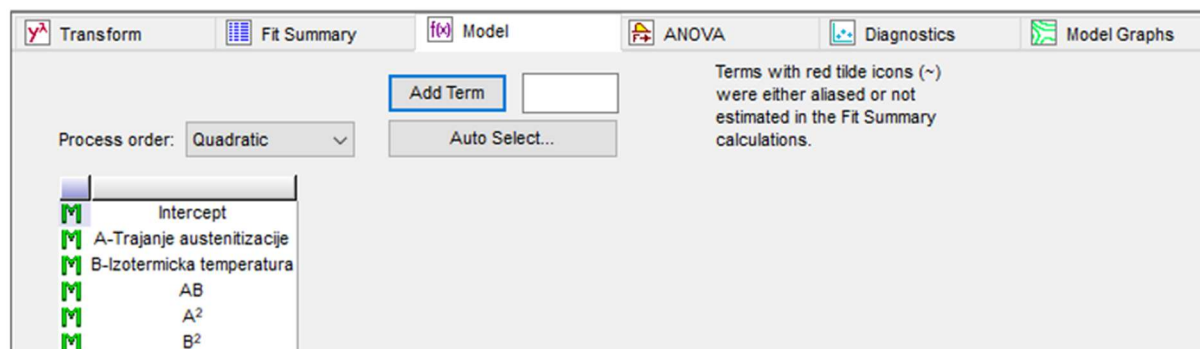
Da bi se ovim programom dobilo potrebne statističke podatke i dijagrame mora se unijeti potrebne inpute. Prvi korak je određivanje vrste transformacije (u ovom slučaju to je tvrdoća) Program sugerira ako je omjer manji od tri(< 3), a u ovom slučaju je manji od tri, tada transformacija nije potrebna . Odabir vrste transformacije je prikazan na slici 6.1.



Slika 6. 1 – Odabir transformacije odzivne veličine [4]

Nakon odabranog tipa transformacije, program sugerira matematičku funkciju (linearna, kvadratna, kubna...) koja najbolje opisuje ovaj slučaj.

U ovom slučaju program je sugerirao kvadratnu matematičku funkciju što je prikazano na slici 6.2.



Slika 6. 2 –Odabir modela matematičke funkcije [4]

Odabirom modela matematičke funkcije analizira se varijanca (ANOVA) za potrebe stvaranja kvadratnog modela, te određivanja značajnosti modela. Rezultat analiziranja varijance prikazan je u tablici 6.3

Tablica 6. 3 – Analiza značajnosti modela [4]

ANOVA for Response Surface Quadratic model					
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]					
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	21045,67	5	4209,13	9,19	0,0055 significant
A-Trajanje austenitizacije	512,56	1	512,56	1,12	0,3252
B-Izotermicka temperatura	17051,16	1	17051,16	37,24	0,0005
AB	1184,59	1	1184,59	2,59	0,1518
A ²	0,17	1	0,17	3,773E-004	0,9850
B ²	998,01	1	998,01	2,18	0,1834
Residual	3205,04	7	457,86		
Lack of Fit	2069,96	4	517,49	1,37	0,4149 not significant
Pure Error	1135,08	3	378,36		

F - vrijednost modela od 9.19 ukazuje da je model značajan. P- vjerojatnost manja od 0,05 ukazuje da je dobiveni model značajan (označeno u uputstvima programa). Postoji samo 0.55 % mogućnosti da se ovako velika F-vrijednost može pojaviti zbog šuma (greške).

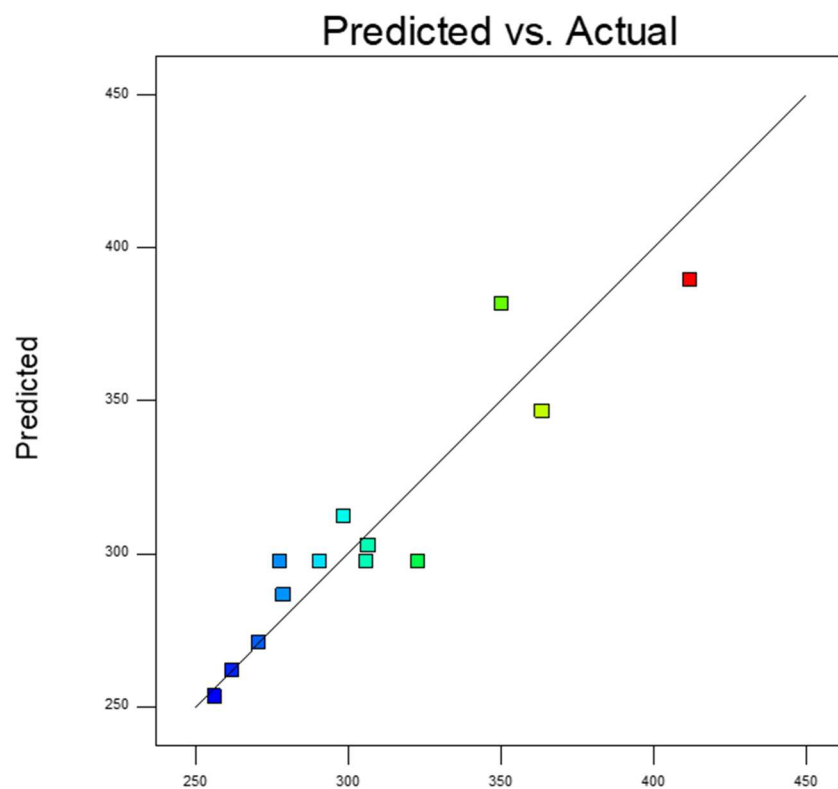
P-vrijednost manja od 0.05 označava da su uvjeti modela značajni. U analiziranom slučaju faktor B je značajan (zbog njegove P-vrijednosti). P vrijednosti veće od 0,1000 označavaju da faktori modela nisu značajni.

F-vrijednost od 1.37 ukazuje da nedostatak usvajanja nije značajan u odnosu na šum (grešku). Postoji 41.49 % mogućnosti da je zbog greške moglo doći do ovako velike F-vrijednosti. Obzirom da je odstupanje modela beznačajno ovaj model je usvojen.

Slika 6.3 prikazuje dijagram odstupanja izmjerenih vrijednosti od teoretskih. Na slici su vidljivi kvadrati od kojih su pojedini na samom pravcu a pojedini su više ili manje udaljeni od pravca. Sam pravac predstavlja očekivane teoretske rezultate (jednadžba pravca zadanog modela), dok kvadrati predstavljaju izmjerene stvarne rezultate. Što su kvadrati bliže pravcu očekivani i izmjereni rezultati se više podudaraju. Iz dijagrama je vidljivo da nema velikih odstupanja od teoretskih vrijednosti što upućuje na dobar odziv transformacije tvrdoće.

Design-Expert® Software
TvrdoćaHV

Color points by value of
TvrdoćaHV:



Slika 6. 3 - Dijagram izmjerenih vrijednosti tvrdoće i vrijednosti predviđenih matematičkim modelom [4]

Tablica 6. 4 – Tablica vrijednosti izmjerenih tvrdoća i tvrdoća predviđenih matematičkim modelom [4]

Run Order	Actual Value	Predicted Value	Residual	Leverage	Internally Studentized Residuals	Externally Studentized Residuals	Cook's Distance	Influence on Fitted Value DFFITS	Standard Order
1	262,00	262,05	-0,0493	0,392	-0,003	-0,003	0,000	-0,002	7
2	350,20	381,93	-31,73	0,491	-2,078	-3,108	0,694	-3,052 ^(*)	8
3	363,60	346,69	16,91	0,706	1,458	1,618	0,852	2,509 ^(*)	1
4	290,60	297,56	-6,96	0,193	-0,362	-0,338	0,005	-0,165	9
5	298,40	311,97	-13,57	0,660	-1,088	-1,105	0,384	-1,542	6
6	306,00	297,56	8,44	0,193	0,439	0,412	0,008	0,201	10
7	322,80	297,56	25,24	0,193	1,312	1,399	0,068	0,683	12
8	306,60	302,85	3,75	0,193	0,195	0,181	0,002	0,089	11
9	270,80	270,91	-0,1100	0,724	-0,010	-0,009	0,000	-0,015	3
10	278,80	286,31	-7,51	0,678	-0,619	-0,590	0,135	-0,857	5
11	412,00	389,57	22,43	0,660	1,796	2,264	1,041 ^(*)	3,151 ^(*)	2
12	277,80	297,56	-19,76	0,193	-1,028	-1,032	0,042	-0,504	13
13	256,20	253,26	2,94	0,724	0,262	0,244	0,030	0,395	4

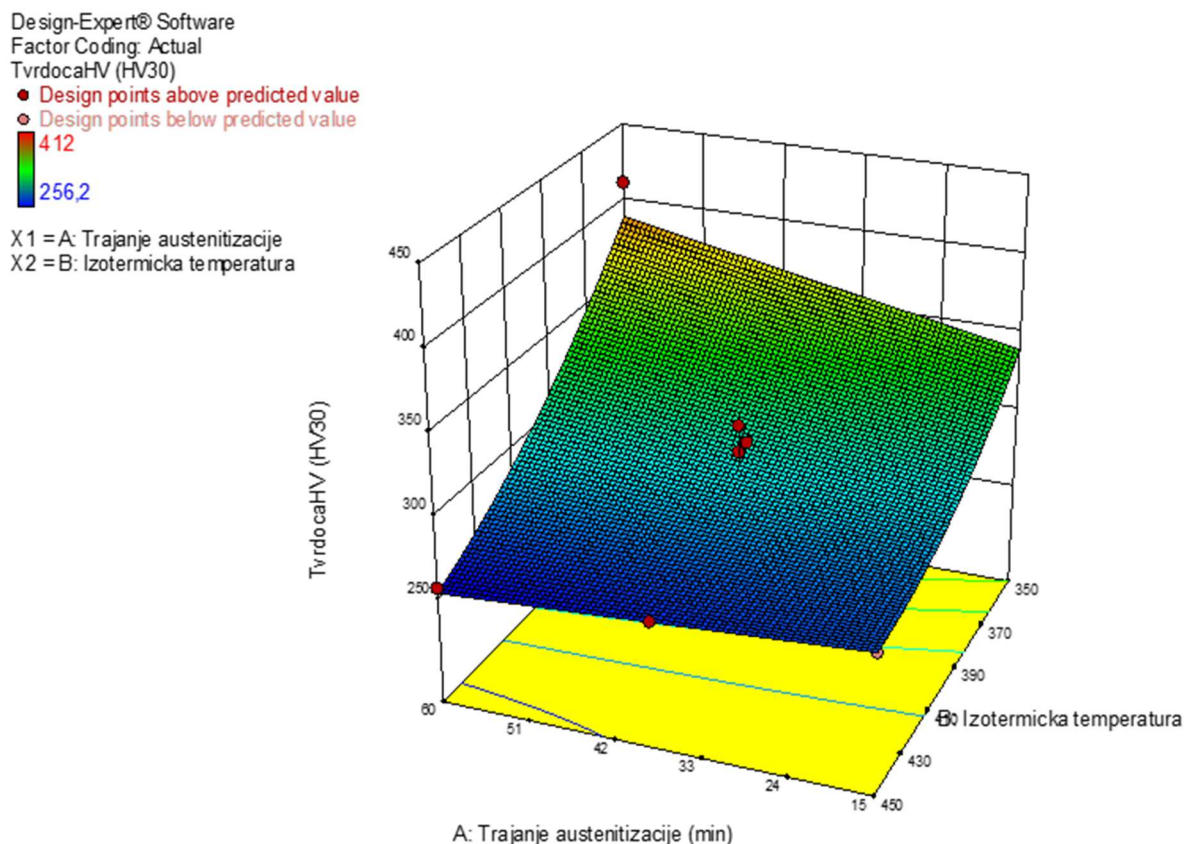
Usporedba brojčanih vrijednosti izmjerenih tvrdoća i vrijednosti predviđenih matematičkim modelom prikazana je u tablici 6.4. Matematički model je prikazan u tablici 6.5. Ova jednadžba nije mjerodavna za dobivanje odziva za svaki pojedini faktor jer su koeficijenti skalirani prema dobivenim rezultatima.

Tablica 6. 5 – Matematička funkcija za određivanje odzivne vrijednosti tvrdoće [4]

$$\begin{aligned}
 \text{TvrdoćaHV} = & \\
 & +1482,77015 \\
 & +6,31772 * \text{Trajanje austenitizacije} \\
 & -5,52558 * \text{Izotermicka temperatura} \\
 & -0,014958 * \text{Trajanje austenitizacije} * \text{Izotermicka temperatura} \\
 & +3,13686\text{E-}004 * \text{Trajanje austenitizacije}^2 \\
 & +6,32482\text{E-}003 * \text{Izotermicka temperatura}^2
 \end{aligned}$$

U 3D dijagramu na slici 6.4 grafički je prikazan statističkom analizom dobiveni matematički model ovisnosti tvrdoće o parametrima toplinske obrade. U dijagramu je vidljivo da je maksimalna tvrdoća ostvarena najduljim držanjem na temperaturi austenitizacije u trajanju od 60 minuta i temperaturom izotermičke kupke od 350 °C, a najniža tvrdoća ostvarena je najduljim držanjem na temperaturi austenitizacije u trajanju od 60 min i najvišom temperaturom

kupke od 450 °C. Nadalje dijagram pokazuje dobro preklapanje teoretskih vrijednosti tvrdoća zadanih modelom i izmjerenih vrijednosti tvrdoća.



Slika 6. 4 – 3D prikaz odstupanja predviđenih vrijednosti [4]

U dijagramu na slici 6.5 vidljivo je da se držanjem na temperaturi austenitizacije u trajanju od 15 minuta ostvaruju se niže tvrdoće nakon obrade ukoliko je izotermička kupka više temperature. Ovaj utjecaj je izraženiji što je trajanje austenitizacije dulje, što je vidljivo u dijagramu na slici 6.6. Nadalje, duljim držanjem na temperaturi austenitizacije od 60 minuta ostvarene su veće maksimalne tvrdoće, a isto tako i niže minimalne vrijednosti tvrdoća u odnosu na trajanje austenitizacije od 15 minuta.

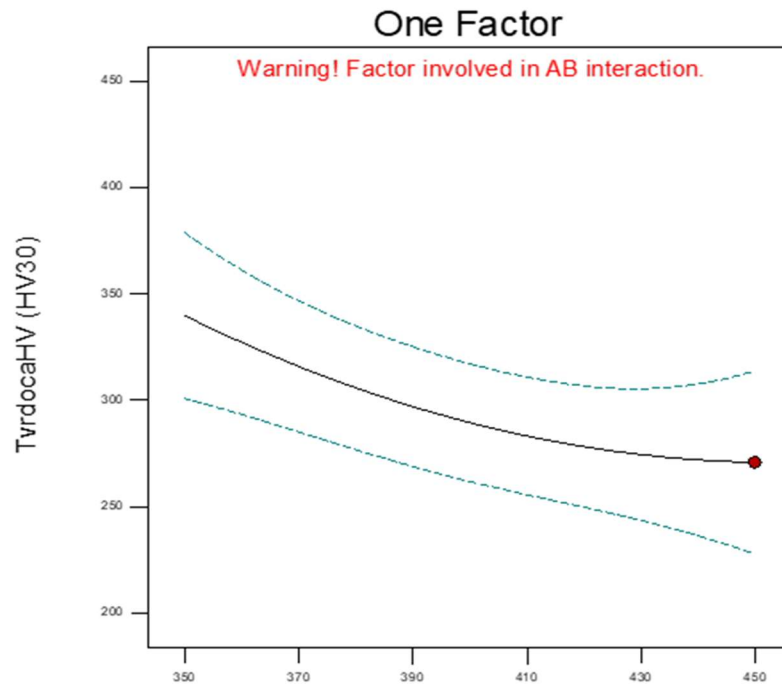
Na slici 6.7 i 6.8 prikazani su dijagrami utjecaja temperature izotermičke kupke od 350 °C i 450 °C, vidljivo je da su se više vrijednosti tvrdoća ostvarile nižom temperaturom izotermičke kupke od 350 °C.

Analizom dijagrama može se zaključiti da su se veće vrijednosti tvrdoće ostvarile duljim držanjem na temperaturi austenitizacije i nižim izotermičkim temperaturama (slika 6.7), produljenje trajanja austenitizacije utječe na porast tvrdoće nakon obrade, dok je kod viših temperatura izotermičkih kupki taj utjecaj manji i suprotnog predznaka (slika 6.8).

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 TvrdoćaHV (HV30)
 ● Design Points
 — 95% CI Bands

X1 = B: Izotermička temperatura

Actual Factor
 A: Trajanje austenitizacije = 15

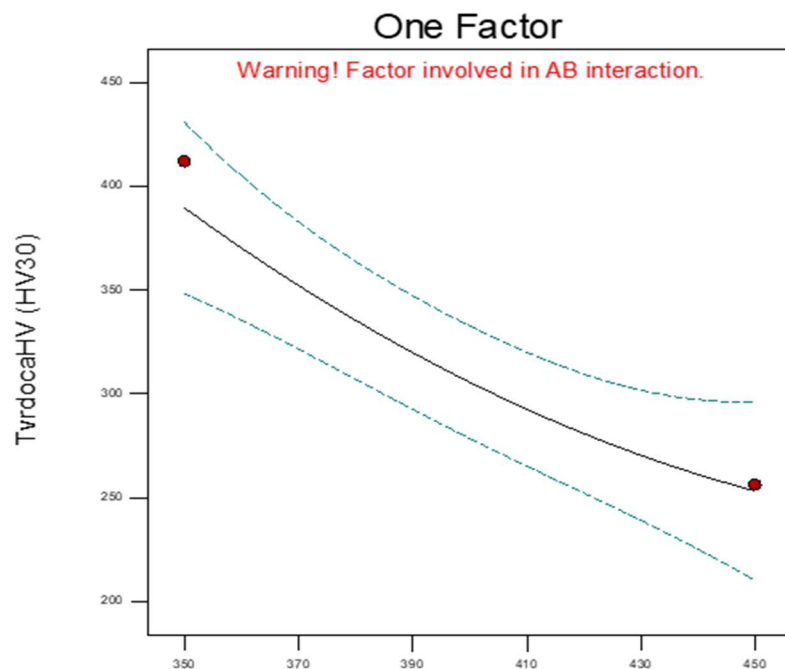


Slika 6.5 - Utjecaj temperature izotermičke kupke na tvrdoću uz konstantno trajanje austenitizacije od 15 minuta

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 TvrdoćaHV (HV30)
 ● Design Points
 — 95% CI Bands

X1 = B: Izotermička temperatura

Actual Factor
 A: Trajanje austenitizacije = 60

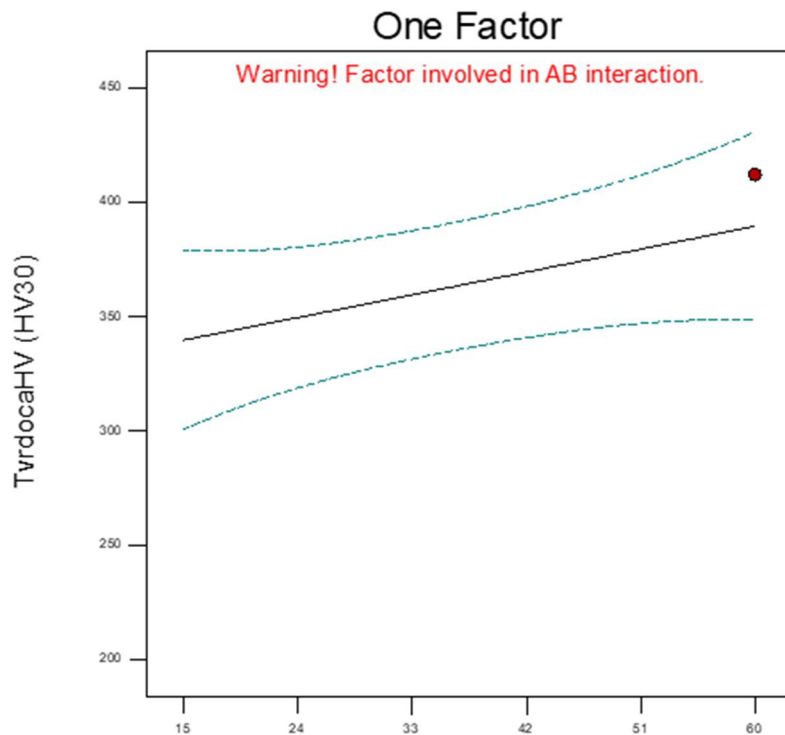


Slika 6. 6 - Utjecaj temperature izotermičke kupke na tvrdoću uz konstantno trajanje austenitizacije od 60 minuta

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 TvrdoćaHV (HV30)
 ● Design Points
 — 95% CI Bands

X1 = A: Trajanje austenitizacije

Actual Factor
 B: Izotermička temperatura = 350

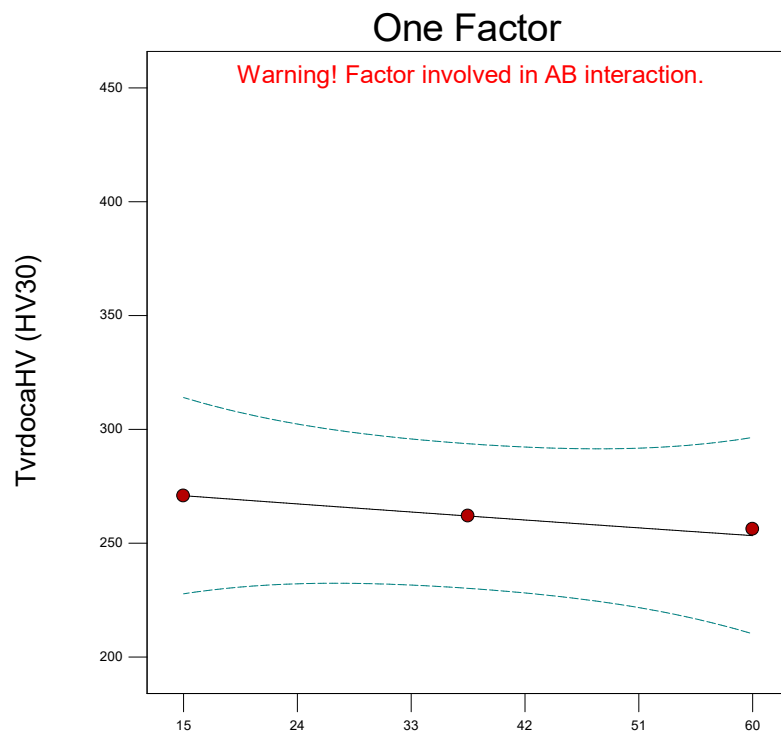


Slika 6. 7 - Utjecaj trajanja austenitizacije na tvrdoću uz konstantnu temperaturu izotermičke kupke od 350 °C

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 TvrdoćaHV (HV30)
 ● Design Points
 95% CI Bands

X1 = A: Trajanje austenitizacije

Actual Factor
 B: Izotermička temperatura = 450



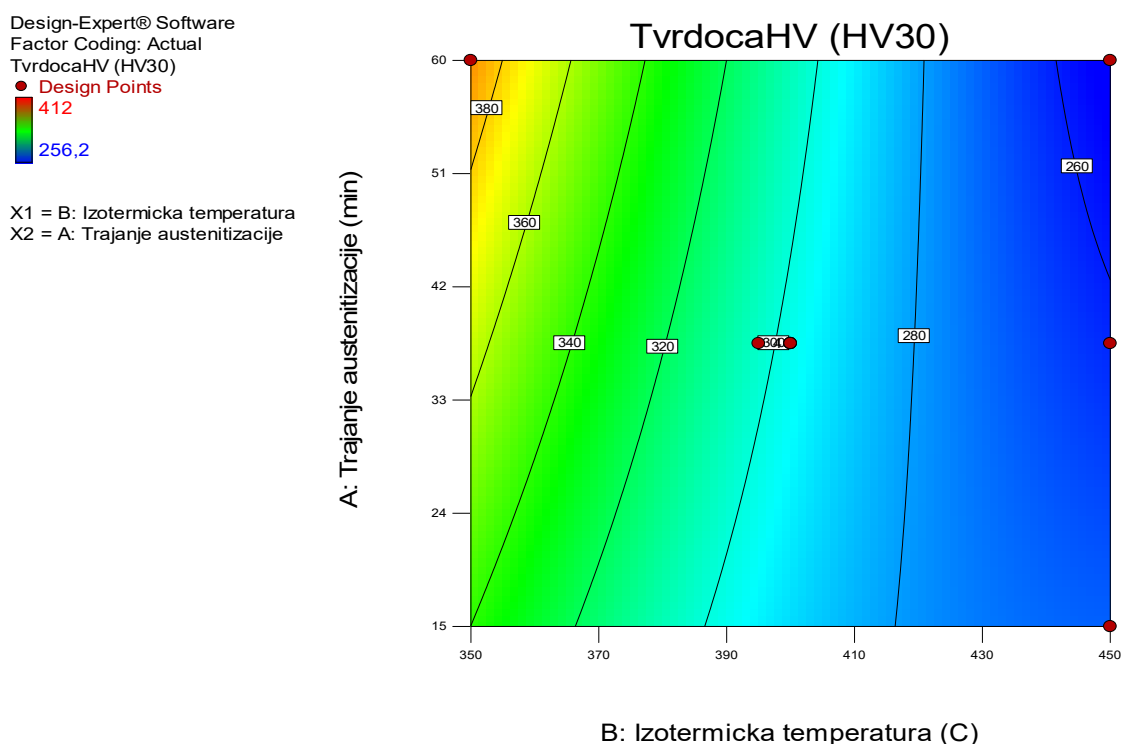
A: Trajanje austenitizacije (min)

Slika 6. 8 - Utjecaj trajanja austenitizacije na tvrdoću uz konstantnu temperaturu izotermičke kupke od 450 °C

Na slici 6.9 prikazan je konturni dijagram tvrdoće. Ovim dijagramom se mogu odrediti kombinacije parametara toplinske obrade za ostvarenje iste vrijednosti iste tvrdoće. Tako se tvrdoću od 320 HV može dobiti austenitizacijom od 60 min i temperaturom izotermičke kupke od 390 °C ili austenitizacijom od 15 minuta i temperaturom izotermičke kupke od 360 °C.

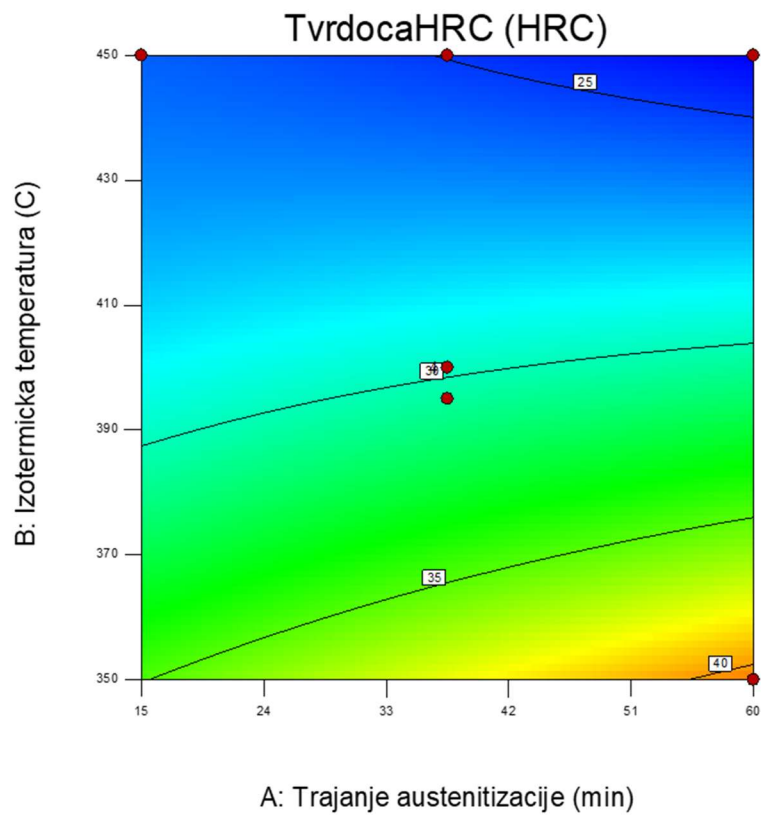
Dakle ovaj dijagram prikazuje linije konstantnih vrijednosti tvrdoća za različite kombinacije trajanja austenitizacije i temperatura izotermičke kupke.

Na slici 6.10 prikazan je sličan konturni dijagram, s razlikom što je tvrdoća izražena prema Rockwell skali.



Slika 6. 9 – Konturni dijagram ovisnosti tvrdoće po Vickersu o parametrima toplinske obrade [4]

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual
TvrdoćaHRC (HRC)
● Design Points
43
24
X1 = A: Trajanje austenitizacije
X2 = B: Izotermička temperatura



Slika 6. 10 – Konturni dijagram ovisnosti tvrdoće po Rockwellu o parametrima toplinske obrade [4]

7. ZAKLJUČAK

U okviru ovog završnog rada izvršena je analiza utjecaja parametara toplinske obrade poboljšavanja na tvrdoću žilavog lijeva.

Preliminarnim pokusima je utvrđeno da je sirovac, iz kojeg su izrađeni uzorci, bio iz nelegiranog nodularnog lijeva, na temelju čega je odabrana toplinska obrada izotermičkog poboljšavanja. Vrijeme držanja uzoraka u izotermičkoj kupki je za sve uzorke bilo podjednako i iznosilo je 5 minuta.

Planiranje pokusa i statistička analiza dobivenih rezultata izvršeno je primjenom računalnog programa „Design-Ekspert 13”.

Glavnim pokusom određen je utjecaj odabranih faktora na tvrdoću nakon toplinske obrade. Faktori koji su se varirali su vrijeme držanja u rasponu od 15 do 60 minuta na temperaturi austenitizacije od 900 °C, te temperatura izotermičke olovne kupke od 345 °C do 450 °C.

Dobiveni rezultati su pokazali da se najveće vrijednosti tvrdoće (srednja vrijednost tvrdoće epruvete od 412 HV30) ostvaruju maksimalnim trajanjem austenitizacije na temperaturi od 900 °C u trajanju od 60 minuta i niskom temperaturom izotermičke kupke od 350 °C. Ovaj rezultat može se dovesti u korelaciju s nastankom donjeg bajnita te s porastom količine rastvorenog ugljika u austenitu (zbog duljeg držanja) i veličine kristalnog zrna do čega dolazi duljim držanjem na temperaturi austenitizacije. S povećanim kristalnim zrnom smanjuje se kritična brzina hlađenja (povećava se minimalno trajanje inkubacije austenita). Smanjenjem kritične brzine hlađenja smanjena je opasnost početka transformacije na višim temperaturama (nastanak mekših faza).

Najniža srednja vrijednost tvrdoće epruvete od 256.2 HV30 postignuta je za isto vrijeme držanja na temperaturi austenitizacije od 900 °C ali u izotermičkoj kupki temperature 450 °C. Može se uočiti da pri višim temperaturama izotermičke kupke trajanje držanja na temperaturi austenitizacije ima suprotan efekt nego pri nižim temperaturama. Pri temperaturi od 450 °C porastom trajanja austenitizacije smanjuje se tvrdoća koja za trajanje austenitizacije od 60 minuta iznosi svega 256.2 HV30. Ovo se može objasniti time da se u ovom slučaju zbog veće temperature izotermičke kupke sav martenzit pretvorio u gornji bajnit (grublja struktura) koji je mekša faza od donjeg bajnita, te nastankom grubljeg zrna koji dodatno utječe na smanjenje tvrdoće.

Obradom rezultata pokusa definiran je matematički model koji se u dobroj mjeri podudara s stvarnim vrijednostima te se može koristiti za procjenu parametara obrade tretiranog žilavog lijeva.

LITERATURA

1. Gabrić I., Šitić S.: *Materijali II*, Sveučilište u Splitu, Sveučilišni odjel za stručne studije, Split, 2015. – Ožujak 2023
2. *Influence of Austempering Temperatures on the Microstructure and Mechanical Properties of Austempered Ductile Cast Iron*. Dostupno na:
https://www.researchgate.net/publication/352474388_Influence_of_Austempering_Temperatures_on_the_Microstructure_and_Mechanical_Properties_of_Austempered_Ductile_Cast_Iron, ožujak 2023
3. Equivalent grades of iron. Dostupno na:
https://globalsupplyline.com.au/wp-content/uploads/2020/09/Equivalent_Grades_of_Iron.pdf, ožujak 2023
4. Program Design-Ekspert 13. Dostupno na:
<https://www.statease.com/software/design-expert/>, travanj 2023
5. Gabrić I.: *Vježba br. 11- Ispitivanje tvrdoće*, Sveučilište u Splitu, Sveučilišni odjel za stručne studije, Split, travanj 2023
6. Universitat zu Kiel. Dostupno na:
https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/mw1_ge/kap_8/advanced/t8_4_2.html, travanj 2023
7. Cijevi od žilavog lijeva. Dostupno na:
<https://www.kubota.com/products/ironpipe/index.html>, travanj 2023
8. Dandong foundry
<http://www.iron-foundry.com/en-gjs-500-7-ductile-cast-iron-ggg50.html>, travanj 2023