

Toplinska obrada alata za oblikovanje ispušnih cijevi

Žalac, Miroslav

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:358017>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-22**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Miroslav Žalac

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor

Prof. dr. sc. Božidar Matijević, dipl. ing.

Student

Miroslav Žalac

Zagreb, 2021.

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno, uz stručne savjete i nadzor mentora, asistenta te koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu. Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Božidaru Matijeviću na uloženom vremenu, prenesenom znanju i pomoći tokom izrade rada, voditelju laboratorija mag. ing. Filipu Žanetiću te gospodinu Željku Kostarinjskom tijekom izrade eksperimentalnog dijela rada te pružili potrebnu pomoć i znanje u Laboratoriju za toplinsku obradu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

Miroslav Žalac



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602-04/21-6/1	
Ur. broj: 15-1703-21	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MIROSLAV ŽALAC** Mat. br.: 0035207779

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Toplinska obrada alata za oblikovanje ispušnih cijevi**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Heat treatment of tools for forming exhaust pipes**

Opis zadatka:

Za izradu alata za oblikovanje ispušnih cijevi u hladnom stanju primjenjuju se alatni čelici za hladni rad kod kojih su glavni zahtjevi visoka otpornost na trošenje i visoka žilavost. Kod uobičajenih kvaliteta alatnih čelika za rad u hladnom stanju nije moguće jednako dobro ispuniti oba zahtjeva već se parametri postupka toplinske obrade trebaju optimirati određeni alat i izabrani čelik. Za proizvodnju kvalitetnih alata potrebno je provesti postupak toplinske obrade s odgovarajućim parametrima (temperatura austenitizacije, trajanje austenitizacije, sredstvo za gašenje, temperatura popuštanja) ovisan o kvaliteti čelika.

U teorijskom dijelu rada opisati alatne čelike za hladni rad, navesti zahtjeve na svojstva koji se postavljaju na alate i moguće vrste toplinske obrade.

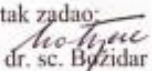
U eksperimentalnom dijelu rada provesti odabranu toplinsku obradu s ciljem određivanja optimalnih parametara toplinske obrade za alat za oblikovanje cijevi ispušnih sistema. Kao kriterij za određivanje parametara koristiti rezultate mehaničkih svojstava te metalografska ispitivanja. Također je potrebno u pogonskim uvjetima provjeriti ponašanje alata u eksploataciji.

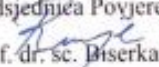
Potrebna ispitivanja provesti u laboratorijima Fakulteta strojarstva i brodogradnje te u pogonu radionice za izradu ispušnih sistema. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu te eventualnu dobivenu stručnu pomoć.

Zadatak zadan:
30. rujna 2021.

Rok predaje rada:
2. prosinca 2021.

Predviđeni datum obrane:
13. prosinca do 17. prosinca 2021.

Zadatak zadao:

 prof. dr. sc. Božidar Matijević

Predsjednica Povjerenstva:

 prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. ALATNI ČELICI.....	3
2.1. Podjela alatnih čelika	4
2.2. Svojstva alatnih čelika	9
2.2.1. Utjecaj legirajućih elemenata na svojstva alatnih čelika	12
2.3. Alatni čelici za hladni rad	15
2.3.1. Ugljični (nelegirani) alatni čelici	15
2.3.2. Niskolegirani alatni čelici za hladan rad	18
2.3.3. Visokolegirani alatni čelici za hladan rad	20
2.4. Toplinska obrada alatnih čelika za hladni rad.....	22
2.4.1. Postupci žarenja	26
2.4.2. Postupak kaljenja alatnih čelika.....	29
2.4.3. Duboko hlađenje	31
2.4.4. Popuštanje čelika	32
3. VAKUUMSKA PEĆ	33
3.1. Vakuum.....	33
3.1.1. Oprema vakuumskih peći	34
3.1.2. Postupci toplinske obrade u vakuumskim pećima	36
4. EKSCENTAR PREŠA	39
5. EKSPERIMENTALNI DIO	40
5.1. X155CrVMo12 – 1; (OCR12VM).....	42
5.2. Priprema uzoraka	44
5.3. Odabir parametara toplinske obrade čelika X155CrVMo12 – 1	45
5.3.1. Temperatura austenitizacije (ϑ_a)	46
5.3.2. Određivanje vremena grijanja (t_{gr}) i režima ugrijavanja	46
5.3.3. Vrijeme držanja na temperaturi austenitizacije (t_{td})	52
5.3.4. Gašenje i sredstva za gašenje	52
5.3.5. Temperature popuštanja.....	56
5.3.6. Očekivana tvrdoća.....	58
5.4. Vakuumska peć	59

5.4.1. Tehnički podaci.....	59
5.5. Rezultati ispitivanja tvrdoće.....	60
5.6. Ugradnja alata u ekscentarsku prešu.....	67
6. ZAKLJUČAK.....	68
LITERATURA.....	69

POPIS SLIKA

Slika 1. Primjeri alata izrađenih od alatnog čelika [3]	4
Slika 2. Podjela alatnih čelika prema radnoj temperaturi [4]	5
Slika 3. Primjeri visoko-legiranih alatnih čelika [3]	7
Slika 4. Sažeta podjela alatnih čelika prema namjeni [2]	7
Slika 5. Prikaz abrazijskog trošenja alata [9]	11
Slika 6. Dijagram popuštanja alatnih čelika [10]	11
Slika 7. Tvrdća ugljičnog čelika u ovisnosti o popuštanju [13]	17
Slika 8. Temperaturno područje austenitizacije (podeutektoidnih, eutektoidnih i nadeutektoidnih) čelika [14].....	17
Slika 9. Dijagram TO čelika X100CrMoV5-1 [13]	20
Slika 10. Opći (osnovni) dijagram postupka toplinske obrade [3].....	23
Slika 11. Isječak Fe – Fe ₃ C dijagrama; A (austenit), F (ferit), P (perlit), K (karbid) [3]	23
Slika 12. TTT (engl. „Time – temperature – transformation“) dijagram; A – austenit; M – martenzit; B – bainit; P – perlit; F – ferlit [3]	24
Slika 13. Kontinuirati TTT dijagram (42CrMo4) [3].....	24
Slika 14. Izotermički TTT dijagram (42CrMo4) [3].....	25
Slika 15. Opći slijed toplinske obrade alata [16]	25
Slika 16. Slikoviti prikaz temperaturnih područja različitih vrsta žarenja [3]	26
Slika 17. Dijagram žarenja za redukciju zaostalih naprezanja [3]	27
Slika 18. Usporedba naprezanja u materijalu prije i poslije žarenja [3]	27
Slika 19. Dijagrami provođenja sferodizacijskog žarenja; a) ispod A ₁ ;b) iznad A ₁ ;c) oko temperature A ₁ [3]	28
Slika 20. Dijagram kontinuiranog hlađenja kod normalizacije čelika [3].....	28
Slika 21. Dijagram usporenog hlađenja kod normalizacije čelika [3]	29
Slika 22. Optimalan izbor temperature austenitizacije za: a) ugljične (nelegirane) čelike, b) podeutektoidne (nisko-legirane) čelike, c) nadeutektoidne (visoko-legirane) čelike [3]	30
Slika 23. Kvalitativan prikaz određivanja gornje kritične brzine hlađenja [17]	31
Slika 24. Dijagram postupka popuštanja čelika [3].....	32
Slika 25. Ekscentar preša na kojoj se primjenjuje alat za ispušne sisteme [22].....	39
Slika 26. Sirovi komad za tokarenje od čelika X155CrVMo12-1	40

Slika 27. Komad čelika X155CrVMo12-1 od kojih su izrađeni uzorci	41
Slika 28. Obrada odvajanjem čestica – glodanje.....	44
Slika 29. Rezanje na željene dimenzije na tračnoj pili.....	44
Slika 30. Dijagram toplinske obrade (opći); 1 – oznaka ruba obratka, 2 – oznaka jezgre obratka, ϑ_0 – početna (sobna) temperatura, $\vartheta_{peć}$ – temperatura (peći) austenitizacije, t_{gr} – vrijeme grijanja (ugrijavanje + progrijavanje), t_{id} – vrijeme držanja, t_u – ukupno vrijeme ugrijavanja [24]	45
Slika 31. Visoko – ugljični ledeburitni alatni čelik [24]	46
Slika 32. Koeficijent prijelaza topline, α	48
Slika 33. TTT dijagram – K110DE [26]	50
Slika 34. Dijagram ugrijavanja jezgre i površine obratka [24]	51
Slika 35. Kontinuirani TTT dijagram za visoko – legirani alatni čelik; X155CrVMo12 – 1 [23]	54
Slika 36. Shematski prikaz postupka popuštanja [24].....	56
Slika 37. Dijagram poboljšanja čelika [24].....	57
Slika 38. Dijagram mehaničkih svojstava u ovisnosti o temperaturi popuštanja [24]	57
Slika 39. Lpsen – vakuumska peć	59
Slika 40. Uzorci u vakuumskoj peći.....	61
Slika 41. Dijagram kaljenja ispitnih uzoraka	61
Slika 42. Uranjanje uzoraka u tekući dušik te izgled uzorka nakon dubokog hlađenja.....	62
Slika 43. Peć za popuštanje čelika (525 °C; 180 °C).....	63
Slika 44. Tvrdomer prema Rockwell metodi	63
Slika 45. Uzorci nakon provedenih ispitivanja	64
Slika 46. Usporedba duboko hlađenih uzoraka s kaljenim uzorkom	65
Slika 47. Usporedba popuštenih uzoraka s kaljenim uzorkom	66
Slika 48. Rotacijski stol s alatima za probijanje i provlačenje.....	67
Slika 49. Izgled lima nakon probijanja izrađenim alatom.....	67

POPIS TABLICA

Tablica 1. Podjela nelegiranih alatnih čelika [5]	5
Tablica 2. Označavanje alatnih čelika prema AISI – SAE standardima [4]	8
Tablica 3. Utjecaj važnijih legirajućih elemenata na svojstva alatnog čelika [4]	13
Tablica 4. Podjela nelegiranih alatnih čelika [4]	16
Tablica 5. Primjeri visokougličnih W – V čelika s pripadajućim kemijskim sastavom [4]	18
Tablica 6. Kemijski sastav nisko-legiranih alatnih čelika (Mn-Cr-V; Mn-Cr-W) [13]	19
Tablica 7. Kemijski sastav značajnijih visoko-ugličnih ledeburitnih čelika [13]	21
Tablica 8. Temperaturna podjela popuštanja [15]	32
Tablica 9. Vrste vakuuma	33
Tablica 10. Temperature popuštanja [21]	37
Tablica 11. Standardne oznake čelika X155CrVMo12-1 u svijetu [23]	42
Tablica 12. Kemijski sastav čelika X155CrVMo12-1 [23]	42
Tablica 13. Koeficijenti linearnog toplinskog širenja [23]	43
Tablica 14. Formula za određivanje omjera; V/A [25]	49
Tablica 15. Literaturni izvadak preporuke za određivanje <i>tid</i> pri sporom ugrijavanju [25]	52
Tablica 16. Očekivane tvrdoće nakon popuštanja zakaljenog čelika (X155CrVMo12 – 1) [26]	58
Tablica 17. Oznake ispitnih uzoraka	60
Tablica 18. Rezultati ispitivanja tvrdoće čelika	64

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
m	g	masa uzorka
A	%	austenit
A_z	%	zaostali austenit
K	%	karbid
K''	%	sekundarni karbid
K_e	%	eutektički karbid
K_p	%	karbid popuštanja
ϑ	°C	temperatura
ϑ_a	°C	temperatura austenitizacije
λ	W/(m*K)	toplinska vodljivost
φ	g/cm ³	gustoća
E	kN/mm ²	modul elastičnosti
c	J/(g*K)	specifični toplinski kapacitet
Bi		biotova značajka
M		martenzit
M_s	°C	martenzit start (početna temperatura stvaranja pri gašenju)
P		perlit
t_{min}	min	minimalno vrijeme trajanja inkubacije
t_{gr}	min	vrijeme ugrijavanja

t_{id}	min	vrijeme držanja na temperaturi austenitizacije
t_{hl}	min	vrijeme hlađenja
v_{kg}	$^{\circ}C/min$	gornja kritična brzina hlađenja
α	W/m^2K	koeficijent konvekcijskog prijelaza topline
ε		koeficijent usporenja ugrijavanja

SAŽETAK

Diplomski rad sastoji se od dva dijela: teorijskog i eksperimentalnog. U prvom (teorijskom) dijelu opisani su alatni čelici, njihova podjela, glavna svojstva te razlike između legirajućih i nelegirajućih čelika. Nakon toga detaljnije su opisani alatni čelici za hladan rad i njihova glavna podjela te pripadajuće toplinske obrade koje su se koristile u ovom radu. Također, opisani su strojevi i njihovi principi rada na kojima su se pripremali uzorci za toplinsku obradu. Isto tako, detaljno je opisana vakuumska peć u kojoj je proveden postupak kaljenja te ekscentar preša na kojoj se koristi alat iz ovog rada.

Eksperimentalni dio sastoji se od ispitivanja raznih postupaka toplinskih obrada kako bi se odredila optimalna svojstva za visoko-legirani ledeburitni Cr-V alatni čelik s dodatkom molibdena. Prije svega bilo je potrebno iz sirovine pripremiti uzorke postupcima obrade odvajanja čestica (glodanje, rezanje, brušenje) kako bi se dobilo 8 identičnih uzoraka za ispitivanje. Nakon toga provedena je toplinska obrada na istima koji su numerički označeni od 0 do 7. Uzorak „0“ označava osnovno stanje alatnog čelika (X155CrVMo12-1), dok su ostali uzorci podvrgnuti postupku kaljenja, a nakon kaljenja svaki uzorak je toplinski obrađen na drugačiji način kako bi se prikazale razlike među različitim postupcima toplinskih obrada.

Za kraj eksperimentalnog dijela ispitane su tvrdoće svih uzoraka na tvrdomjeru prema Rockwell-u te je izrađeni alat testiran u eksploatacijskim uvjetima u proizvodnji u tvrtki Auspuhu Lastovčić d.o.o.

Ključne riječi: toplinska obrada, alat, alatni čelik, X155CrVMo12-1

SUMMARY

The thesis consists of two parts; theoretical and experimental. The first (theoretical) part describes tool steels, their division, main properties, and differences between alloying and non-alloying steels. Following that, tool steels for cold work and their main division are described in detail, as well as the associated heat treatments used in this work. Also, machines and their working principles on which samples for heat treatment were prepared are described. The vacuum furnace in which the hardening process was performed and the eccentric of the bar on which the tool from this work is used is described in detail.

The experimental part consists of testing various heat treatment procedures to determine the optimal properties for high-alloy ledeburite Cr-V tool steel with molybdenum addition. First of all, it was necessary to prepare samples from the raw material by particle separation processing (milling, cutting, grinding) in order to obtain 8 identical samples for testing. After that, heat treatment was performed on them numerically marked from 0 to 7. Sample "0" indicates the basic state of tool steel (X155CrVMo12-1), while other samples were subjected to the hardening process. After hardening, each sample was heat-treated in a different way to show the differences between different heat treatment processes.

At the end of the experimental part, the hardnesses of all samples on the hardness tester according to Rockwell were tested and the manufactured tool was tested in operating conditions in production in the company Auspuh Lastovčić d.o.o.

Key words: heat treatment, tool, tool steel, X155CrVMo12-1

1. UVOD

Za svaki proizvodni postupak potreban je alat, tj. pomagalo (sredstvo) koje omogućava, olakšava i ubrzava izvršenje željenog rada (proizvodnog postupaka). Osnovni princip alata jest oslobađanje određene količine energije istim te pravilno usmjerenje na željenu točku i/ili površinu obratka u nekom vremenskom periodu. Iz dana u dan se proizvode i razvijaju novi inovativni alati, a najčešće se izrađuju od alatnog čelika. Alatom se u širem smislu smatraju razna pomagala kao što su: rezni alati (svrdlo, glodalo, nož, itd.), stezni alati (razne naprave), mjerni alati (kutomjer, pomično mjerilo, šestar, itd.), ručni alati (čekić, turpija, ključ, matica, itd.), ručni alati s pogonom (pneumatski i električni), alati za oblikovanje deformiranjem, alati za lijevanje, alati za preradu polimera i dr. [1].

Alatni čelici su jedna posebna grupa čelika koji su u svakodnevnoj uporabi te su potrebni za bilo kakvu proizvodnju koju čovjek upotrebljava. Spadaju u grupu specijalnih čelika; to su vrste legalnih i ugljičnih čelika (visokougličnih) s prikladnim svojstvima te kako i sam naziv kaže, mogu se izrađivati različite vrste alata. Alat je izložen složenom pojedinačnom i međusobnom djelovanju mehaničkih, toplinskih, korozijskih, triboloških i drugih procesa čiji učinci ovise o:

- alatnom materijalu
- obrađivanom materijalu
- konstrukciji i karakteristikama alata
- vrsti i parametrima obrade
- okolišu u kojem se alat koristi.

Vijek trajanja alata zbog tih učinaka značajno se može smanjiti. Zato je važno odabrati odgovarajući materijal od kojeg će se izraditi alat, a to utvrđujemo iz primarnih i sekundarnih zahtjeva. Potrebno je odrediti optimalan sadržaj prisutnih legiranih elemenata kako bi se dobio traženi kemijski sastav. Zatim je jako važno provesti postupak toplinske obrade i odrediti odgovarajuće parametre toplinske obrade za odabrani materijal (kako i na koji način će se provoditi zagrijavanje, temperatura austenitizacije te trajanje austenitizacije, odabir odgovarajućeg sredstva za gašenje, hoće li će se alat podvrgnuti dubokom hlađenju, temperatura popuštanja i dr.) kako bi se zadovoljila tražena svojstva [2].

U ovom radu opisani su alatni čelici, njihova podjela, navedeni su zahtjevi na svojstva koja se postavljaju za izradu alata ispušnih sustava, opisan je postupak obrade prije i poslije toplinske obrade te vakuumska peć u kojoj je provedena toplinska obrada. Također, u opisu su obuhvaćeni svi strojevi koji su se koristili kod obrade alatnog čelika i sam stroj (ekscentar preša) na kojem se izrađeni alat koristi. U eksperimentalnom dijelu na uzorcima je provedeno ispitivanje raznih kombinacija toplinskih obrada te su rezultati istih međusobno uspoređeni.

2. ALATNI ČELICI

Alatni čelici po svom kemijskom sastavu i svojstvima, a samim time i zahtjevima koja im se nameću znatno se razlikuju od drugih grupa čelika. Primarna korist alatnih čelika jest izrada različitih vrsta alata za oblikovanje i obradu metalnih i/ili nemetalnih materijala, obradu rezanjem, ručnih alata i pribora te dr. U pravilu se koriste u toplinski obrađenom stanju, a sami materijal se isporučuje uglavnom u hladno vučenom, vruće valjanom ili u odljevku šipke, ploča ili traka. Od alatnog čelika prije svega traži se visoka otpornost na trošenje, tvrdoća i žilavost te dimenzijska stabilnost. Na povišenim radnim temperaturama visoka tvrdoća postiže se legiranjem; legirnim elementima kao što su Cr, V, W, Mo, Si, Mn; elementima zvanim karbidotvorci. Krom i nikal su takozvani lutajući elementi, najčešće su slučajno prisutni u sirovinama te u većini slučajeva u neočekivanim količinama. Povećavaju prokaljivost te isto tako mogu izazvati nejednaku (lošiju) toplinsku obradu. Vanadij je ključan u sprječavanju rasta austenitnog zrna. Silicij je element zadužen za uklanjanje oksida; tkz. dezoksidans. Ukoliko je njegov udio u leguri veći od 0,5 %, tada povećava otpornost, a smanjuje žilavost čelika. Prisutnost mangana povećava prokaljivost, ali s time se povećava i austenitno zrno pri povišenoj temperaturi austenitizacije i vremenu austenitizacije iz čega slijedi da je čelik s većim postotnim udjelom mangana skloniji lomu. U širem smislu, alatni čelici namijenjeni su za izradu alata za:

- obradu rezanjem
- obradu deformiranjem
- kalupe za lijevanje
- izradu mjernih i kontrolnih pribora
- izradu ručnih alata [2].

Slika 1 prikazuje primjere alata iz svakodnevnog života izrađenih od alatnog čelika.



Slika 1. Primjeri alata izrađenih od alatnog čelika [3]

2.1. Podjela alatnih čelika

Uzevši u obzir kemijski sastav, alatni čelici dijele se u sljedeće skupine:

- nelegirane (uglične) čelike
- niskolegirane čelike
- visokolegirane čelike [4].

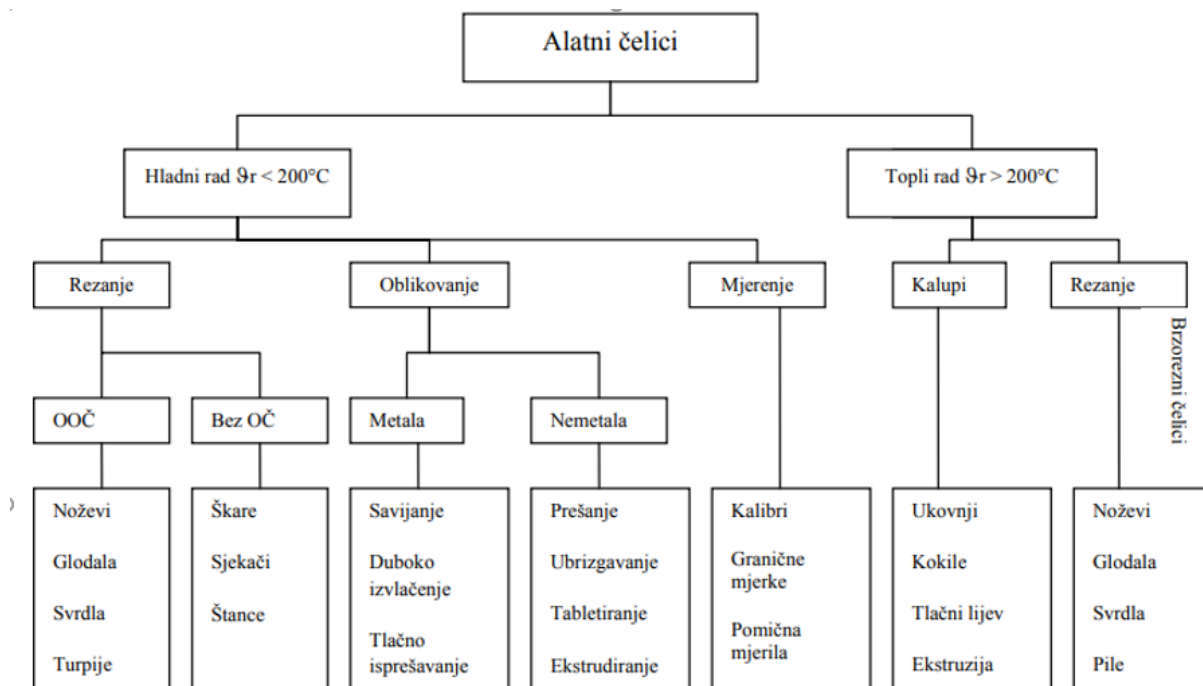
Nelegirane alatne čelike možemo podijeliti ovisno o postotnom udjelu ugljika prikazanom u sljedećoj tablici:

Tablica 1. Podjela nelegiranih alatnih čelika [5]

	%C
Mekane	0,60 ... 0,75
Žilave	0,76 ... 0,90
Žilavo-tvrde	0,91 ... 1,05
Osrednje tvrde	1,06 ... 1,15
Tvrde	1,16 ... 1,30
Vrlo tvrde	1,31 ... 1,50

Također, na sljedećoj slici (Slika 2) može se vidjeti podjela alatnih čelika prema radnoj temperaturi:

- alatni čelici za hladni rad ($\vartheta_r < 200^\circ\text{C}$)
- alatni čelici za topli rad ($\vartheta_r > 200^\circ\text{C}$)
- brzorezni čelici [4].



Slika 2. Podjela alatnih čelika prema radnoj temperaturi [4]

Jedna od važnijih karakteristika, odnosno zahtjeva za alatne čelike u hladnom stanju (za temperature između 20 °C do 200 °C) su otpornost na udarce, trošenje i koroziju, a za alatne čelike za rad u toplom stanju (za temperature veće od 200 °C) su otpornost na popuštanje, otpornost na trošenje, otpornost na koroziju, udarce i umor materijala. Brzorezni čelici (zadnji stupac sa Slika 2) prema kemijskom sastavu svrstavaju se u posebnu grupu alatnih čelika te se mogu podijeliti na:

- čelike s 18 % volframa
- čelike s 12 % volframa
- čelike s 10 % volframa
- W – Mo čelici
- Mo čelici [4].

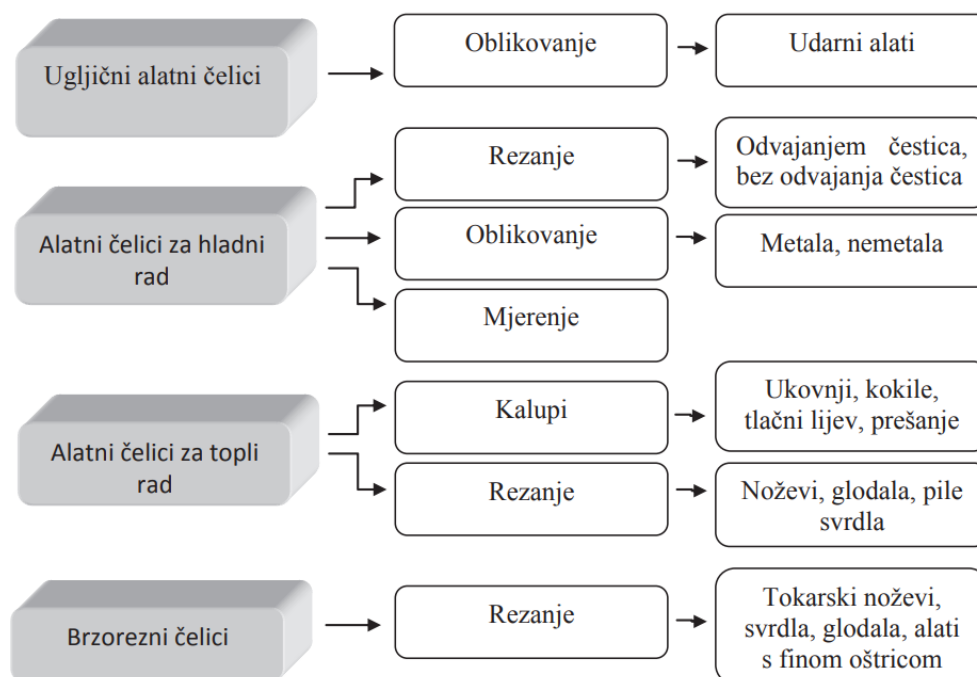
Prema namjeni mogu se podijeliti u sedam glavnih skupina:

- 1) Ne legirani (ugljični) čelici
- 2) Nisko-legirani čelici za hladni rad; radna temperatura – $\vartheta_r < 200$ °C
 - a. nisko-legirani Cr – čelici
 - b. nisko-legirani Mn – Cr – V i Mn – Cr – W čelici
 - c. visoko-ugljični W – V čelici
 - d. nisko i srednje ugljični W – Cr – (Si) – V čelici
- 3) Visoko-legirani čelici za hladni rad; radna temperatura – $\vartheta_r < 200$ °C
 - a. čelik X100CrMoV 5 – 1
 - b. ledeburitni (podeutektički), visoko-legirani s 12 % Cr
 - c. nehrđajući martenzitni (12 – 18 % Cr)
- 4) Alatni čelici za topli rad; radna temperatura – $\vartheta_r > 200$ °C
 - a. nisko-legirani čelici (čelici za ukovnje)
 - b. visoko-legirani čelici za kalupe za tlačno lijevanje
 - c. visoko-legirani W – Cr – V čelici za kalupe za tlačno lijevanje
- 5) Brzorezni čelici
- 6) Maraging čelici
- 7) Korozijski postojani precipitacijski očvrnuti (PH) čelici [6].



Slika 3. Primjeri visoko-legiranih alatnih čelika [3]

Slika 4 prikazuje sažetu podjelu alatnih čelika prema namjeni. Sadržaj ugljika u ugljičnim (nelegiranim) alatnim čelicima iznosi od 0.6 %C do 1.4 %C. Glavna karakteristika ove vrste čelika jest dobra žilavost, visoka tvrdoća (otprilike od 60 do 64 HRC) i dobra otpornost na trošenje, ali samo pri manjim brzinama i temperaturama do 150 °C. Ova vrsta čelika prikladna je za izradu alata s jakim udarnim opterećenjima [7].



Slika 4. Sažeta podjela alatnih čelika prema namjeni [2]

U sljedećoj tablici prikazana je podjela alatnih čelika prema AISI – SAE standardu.

Tablica 2. Označavanje alatnih čelika prema AISI – SAE standardima [4]

Vrsta	AISI - SAE razred	Značajne karakteristike
Otvrdnjavajući u vodi	W	Kaljenje u vodi
Alatni čelik za hladni rad (< 200 °C)	O	Kaljenje u ulju
	A	Kaljenje na zraku
	D	Visok sadržaj C i Cr
Otporni na udarce	S	
Brzorezni čelik	T	Na bazi W
	M	Na bazi Mo
Alatni čelik za topli rad (> 200 °C)	H	H1 - H19: na bazi Cr
		H20 - H39: na bazi W
		H40 - H59: na bazi Mo
Čelici za kalupe (injekcijsko prešanje)	P	P1 - P19: nisko-ugljični
		P20 - P39: ostali
Čelici za posebne svrhe	L	Nisko-legirani
	F	Volframovi karbidi

U nastavku su ukratko opisani razredi koji su dio teme ovog rada:

- O razred → predstavlja razred alatnih čelika za hladni rad gašenih u ulju (nakon toplinske obrade); oznake „O1“. Kemijski sastav „O1“ razreda sastoji se od 0,9 %C; 1,0 %Mn; 0,5 %Cr; 0,5 %W. Kaljenje se vrši u ulju kako bi se ublažio proces kaljenja te samim time spriječio mogući nastanak promjena dimenzija i pukotina uslijed kaljenja. Zbog visokog postotno udjela ugljika ova grupa čelika ima visoku tvrdoću na niskim temperaturama, a na povišenim temperaturama (temperaturi iznad 150 °C) utječe značajno popuštanje.
- A razred → predstavlja razred oznake „A2“ alatnih čelika kaljenih na zraku. Kemijski sastav sastoji se od 0,95 %C do 1,05 %C; 4,75 %Cr do 5,50 %Cr, 0,90 %Mo do 1,40 %Mo; 0,14 %V do 0,50 %V; sadrže veću količinu legiranih elemenata.

Najznačajniji legirni elementi su krom, molibden i vanadij koji posebno sudjeluju u povećanju tvrdoće čelika. Gašenjem na zraku smanjuje se sklonost dimenzijskim promjenama i mogućoj tendenciji pucanja.

- D razred → čelici kod kojih je sadržaj Cr između 10 % do 18 %. Zbog visokog postotnog udjela Cr u kemijskom sastavu neki čelici iz ovog razreda smatraju se nehrđajućim (djelomično nehrđajućim) alatnim čelicima. Tipičan primjer kemijskog sastava ovog razreda čelika sadrži oko 1,5 %C; od 11 %Cr do 13 %Cr; oko 0,45 %Mn; 0,7 %Mo; 1 %V; oko 0,30 % Si te maksimalno 0,030 % P i S. Ova vrsta čelika ima veliku otpornost na trošenje[4].

2.2. Svojstva alatnih čelika

Zahtjevi koji se postavljaju na svojstva alata mogu se općenito podijeliti na:

- I. temeljne (osnovne) zahtjeve – zahtjevi koji obuhvaćaju sve vrste alata
 - visoka otpornost na trošenje (abrazija - Slika 5, adhezija, tribooksidacija, umaranje)
 - visoka žilavost (udarna izdržljivost u eksploatacijskim uvjetima rada)
- II. posebne zahtjeve
 - toplinska stabilnost; otpornost na popuštanje – u užem smislu pod otpornošću prema popuštanju uobičajeno se podrazumijeva što manje sniženje tvrdoće povišenjem radne temperature alata
 - dobra otpornost na oksidaciju
 - dobra otpornost na toplinski umor
 - dobra zakaljivost čelika
 - dobra prokaljivost čelika
 - dimenzijska postojanost u radu
 - što bolja korozijska postojanost
 - dimenzijska postojanost pri kaljenju u popuštanju

- regulacija veličine austenitnog zrna – ovisi o parametrima austenitizacije i metalurškoj preradi; porast zrna sprječava se prisutnošću teško topivih nečistoća

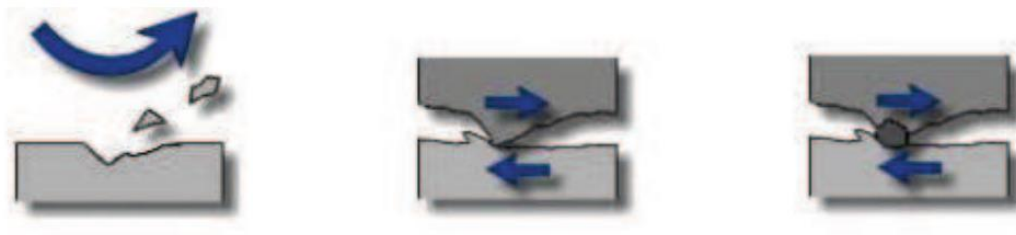
III. proizvodne zahtjeve

- mogućnost obrade odvajanjem čestica (općenito mogućnost obrade odabranog čelika; tokarenje, rezanje, brušenje, itd.) – elektroerozijom
 - jednostavnija izrada kompliciranih geometrijskih oblika
 - veća produktivnost i radna preciznost
 - obrada prethodno kaljenih i poboljšanih čelika
 - obrada nepristupačnih dijelova predmeta
 - učinkovita i ekonomična obrada odvajanjem čestica
 - zbog ugrijavanja ima utjecaj na alatne čelike na: mikrostrukturu, stanje naprezanja, stvaranju pukotina, tvrdoću, čvrstoću te sadržaj C
- estetski izgled (mogućnost poliranja obrađivane površine)
- cijena sirovine (ekonomičnost)
- mogućnost i vremenski rok nabave čelika
- otpornost na razugljičenje [2, 4, 6, 8].

Stupanj zakaljivosti je omjer izmjerene tvrdoće koja se postiže kaljenjem i maksimalne moguće tvrdoće. Iz njega se saznaje koliki je postotak martenzita u strukturi (npr. $S_{kalj}=1$; 100% martenzitna struktura).

Zakaljivost je svojstvo čelika da gašenjem s temperature austenitizacije postigne što veću tvrdoću na površini čelika. Zakaljivost je viša što je viši sadržaj ugljika koji je otopljen u austenitu, tj. koji sudjeluje u procesu zakaljivanja.

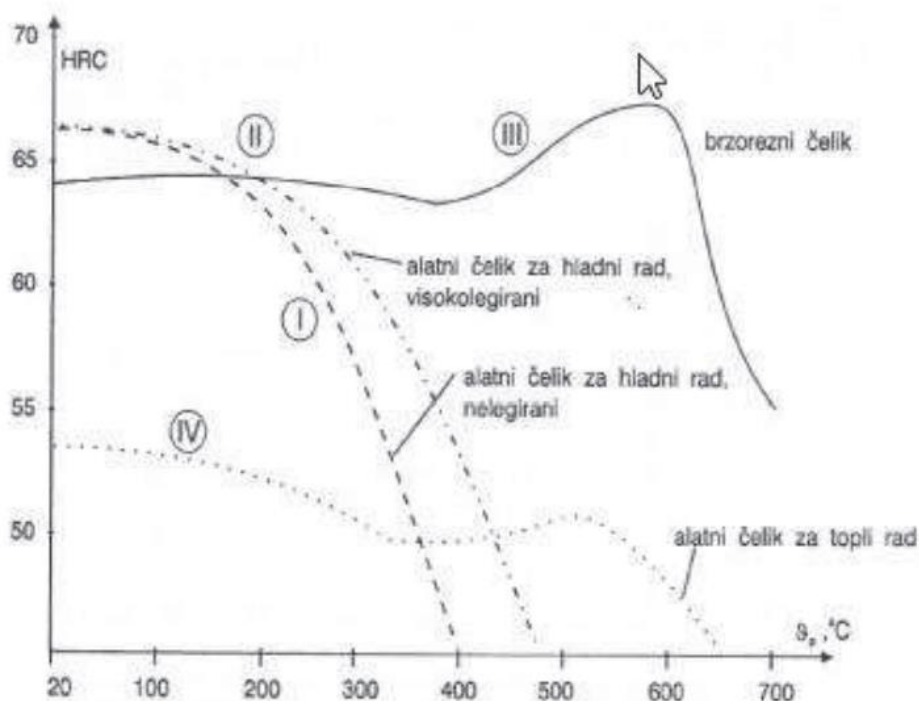
Prokaljivost ovisi o dimenzijama predmeta, legirnim elementima i sredstvu gašenja [1].



Slika 5. Prikaz abrazijskog trošenja alata [9]

Kao što je navedeno u uvodnom dijelu, alatni čelici primjenjuju se u toplinski obrađenom stanju; kaljenom, popuštenom odnosno poboljšanom stanju. Isto tako da bi se povisila kvaliteta samog alata moguće je provesti neke od sljedećih postupaka:

- toplinsko kemijski postupci (boriranje, oksidacija, nitriranje, cementiranje, karbonitriranje, difuzija elemenata metala kao što su Cr, Al, V, Si
- kaljenjem površinskog dijela čelika (elektronskim snopom, indukcijsko, impulsno, plameno te lasersko kaljenje)
- nanošenjem nitrida, karbida i raznih oksida iz parnih faza (PVD, CVD postupci) [4].



Slika 6. Dijagram popuštanja alatnih čelika [10]

2.2.1. Utjecaj legirajućih elemenata na svojstva alatnih čelika

Vrlo je važno odrediti u kojoj se mjeri dodaju legirajući elementi. Kako bi se postigla tražena svojstva (svojstva kao što su prokaljivost, otpornost na trošenje i koroziju i sl.) potrebno je tu traženu količinu na visokim temperaturama u odabranim pećima otopiti s teško taljivim metalima te na taj način postići adekvatan kemijski sastav. Isto tako, prisutne su i razne primjese elemenata koju mogu sa sobom utjecati negativno na samu kvalitetu čelika. Zbog toga važno je regulirati maseni udio takvih elemenata na minimum. Iz toga možemo istaknuti dvije vrste elemenata:

- štetne koji štete legiranju – Mn, Si, S, H, P, O, nemetalni uključci (sulfatni; oksidni; silikatni uključci)
- korisne legirajuće elemente – Cr, Mo, Ni, W, Cu, V, Ti, Al [11].

Pri proizvodnji naročito se izbjegavaju plinovi kao što su dušik, vodik, kisik koji svojom prisutnošću narušavaju svojstva samog čelika (npr. dušik uzrokuje pojavu starenja; kako bi čelik postao otporan na tu pojavu, dodaju se elementi Ti, Al, Nb te na taj način dušik prelazi u nitride). Nemetalni uključci negativno utječu tako što čeliku pada duktilnost, smanjuje se žilavost i čvrstoća. Koliko će i u kojoj mjeri utjecati na svojstva čelika ovisno o količini, vrsti i njihovom rasporedu. Sumpor i fosfor ubrajaju se u značajnije štetnije elemente. Fosfor sa željezom stvara supstitucijski kristal mješanac te na taj način kod čelika uzrokuje pojavu krhkosti. Sumpor također sa željezom stvara FeS koji nije poželjan, zbog toga što se javlja po granicama zrna [2].

U sljedećoj tablici navedeni su neki od najvažnijih elemenata koji imaju značajan utjecaj na svojstva alatnih čelika.

Tablica 3. Utjecaj važnijih legirajućih elemenata na svojstva alatnog čelika [4]

Legirajući element	Utjecaj na prokaljivost	Istaknuti utjecaj na svojstva
Mo	+++	Na povišenim temperaturama povećava otpornost na puzanje, usporava pad tvrdoće te povećava konvencionalna granica razvlačenja Rp0.2
Mn	++	Uz visok postotni udio Mn povećava se otpornost na trošenje
Si	+	Povisuje konvencionalnu granicu razvlačenja Rp0.2
Cr	+	Povećava otpornost na trošenje; otpornost na koroziju(uz sadržaj Cr>12%)
W	+	Na sobnoj i pri povišenim temperaturama sprječava pad tvrdoće čelika te povećava otpornost na trošenje
Ni	+	Povećava žilavost
Co	-	Pri povišenim temperaturama sprječava pad tvrdoće
V	+	Pri povišenim temperaturama sprječava pad tvrdoće te na previsokoj temperaturi austenitizacije sprječava nagli rast austenitnog zrna

Oznaka „+“ označava jačinu utjecaja legirajućeg elementa na svojstva; oznaka „-“ nema značajan utjecaj na svojstva alatnog čelika

Alatni čelici najčešće se izvode legiranjem gore navedenih legiranih elemenata (iz Tablica 3) s jednim i/ili kombinacijom istih. Legirni elementi mogu se pojaviti u različitim oblicima: rastvoreni u FCC ili BCC rešetci kao spojevi sa željezom (intermetalni spojevi i/ili karbidi) te kao nemetalni uključci (nitridi, oksidi, sulfidi) Važno je navesti utjecaj legirajućih elemenata na tip karbida koji se formira u čeliku:

- Mn formira $(FeMn)_3C$
- Cr formira Cr_7C_3 ili $Cr_{23}C_6$
- W formira Fe_3W_3C , WC, W_6C
- Mo formira Mo_2C
- V formira V_4C_3 , VC [4].

Molibden (Mo) – dolazi u kombinaciji s drugim elementima. Povišuje granicu puzanja, granicu razvlačenja te vlačnu čvrstoću. Povišuje prokaljivost i pozitivno djeluje na stvaranje sitnozrnate mikrostrukture. Molibden je jak karbidotvorac. Dodaje se u čelik legiranim s Ni, Cr i Mn kako bi se smanjio mogući rizik od pojave krhkosti

Mangan (Mn) – dezoksidans koji na sebe veže sumpor. Povišuje žilavost i povećava prokaljivost te utječe na pogrubljenje austenitnog zrna (u ovisnosti o temperaturi i vremenu austenitizacije (t_a)). Čelici s većim postotkom Mn skloni su pucanju pri hlađenju iz razloga što Mn sam po sebi snižava početnu temperaturu stvaranja martenzita pri gašenju – M_s (martenzit start). Ukoliko je deblji sloj martenzita po presjeku i brzina između početka i završetka stvaranja martenzitne strukture velika, čelik neće biti sposoban to izdržati i doći će do loma.

Silicij (Si) – dobar dezoksidant. Povišuje dinamičku izdržljivost, granicu elastičnosti, čvrstoću te otpornost na trošenje, a u slučaju visokog udjela ugljika smanjuje žilavost.

Krom (Cr) – jak karbidotvorac; tvori karbide tvrđe od cementita. Oni povišuju otpornost na abrazijsko trošenje i tlak. Cr povećava prokaljivost te proširuje feritno područje. Čelici nakon austenitizacije koji su legirani s Cr mogu se hladiti na zraku ili u ulju. Korozijska postojanost postiže se postotnim udjelom većim od 12 % Cr u leguri. Cr smanjuje toplinsku vodljivost i rastezljivost.

Nikal (Ni) – legirni element koji se otapa u željeznoj rešetci. Koristi se kod kemijskih postojanih i nehrđajućih čelika, vatrootpornih čelika i sl. Najčešće dolazi u kombinaciji s drugim elementima (skup).

Vanadij (V) – jaki karbidotvorac (V_4C_3); vrlo otporan karbid i pri visokim temperaturama austenitizacije (ne dislocira). Povišuje otpornost na trošenje i tvrdoću te granicu razvlačenja, a sprječava rast austenitnog zrna. Moguće su razne kombinacije postotnog udjela vanadija ovisno o traženim svojstvima alata (npr. veći udio vanadija sprječava rast austenitnog zrna, tj. vanadij se zadrži kao V_4C_3 karbid; a manji udio vanadija omogućuje veću prokaljivost tako što se karbid otopi u austenitu). Ovisno o namjeni uporabe alata i dimenzijama samog alata moguća je potpuna kontrola prokaljivosti i širok raspon temperature austenitizacije [3, 4].

2.3. Alatni čelici za hladni rad

Alatni čelici za hladni rad najčešće su nisko-legirani ili nelegirani. Namijenjeni su za mehaničku obradu i oblikovanje do 200 °C. Odlikuju se visokom tvrdoćom, dobrom žilavošću i obradivošću te dobrom otpornošću na trošenje. Alati izrađeni od legiranog alatnog čelika mogu izdržati znatna opterećenja i brzine rezana čak do 300 m/min [3].

2.3.1. Ugljični (nelegirani) alatni čelici

Nelegirani alatni čelici trenutno zauzimaju oko 10 % u ukupnoj masi udjela proizvedenih alata. Iako su im svojstva podosta loša održavaju velik postotni udio proizvedenih alata zbog:

- jednostavnosti za toplinsku obradu
- najpristupačniji su cjenovno
- najžilaviji od svih alata
- najlakše se obrađuju
- znatno se bolje zavaruju od ostalih
- niske temperature austenitizacije
- manja osjetljivost razugljičenju površine tijekom toplinske obrade [4].

Sadržaj ugljika kod nelegiranih čelika za hladan rad iznosi od 0,5 % do 1,5 % C. Povišenjem sadržaja ugljika raste i tvrdoća, dok je žilavost obrnuto proporcionalna postotnom udjelu ugljika. Takva vrsta čelika namijenjena je za izradu alata jednostavnijih oblika i manjih presjeka jer imaju vrlo nisku prokaljivost (približno 10 mm) zbog toga što nisu legirani, ali zato imaju dobru žilavost zbog martenzitne mikrostrukture po rubnim slojevima nakon toplinske obrade (kaljenja), a eutektoidna mikrostruktura ostaje u jezgri. Toplinska obrada provodi se na nižim temperaturama i gasi se nadkritično u vodi. Isto tako se provodi i popuštanje (do 200 °C) zbog naglog pada tvrdoće (Slika 7). Prema DIN standardima, nelegirani alatni čelici dijele se na četiri skupine:

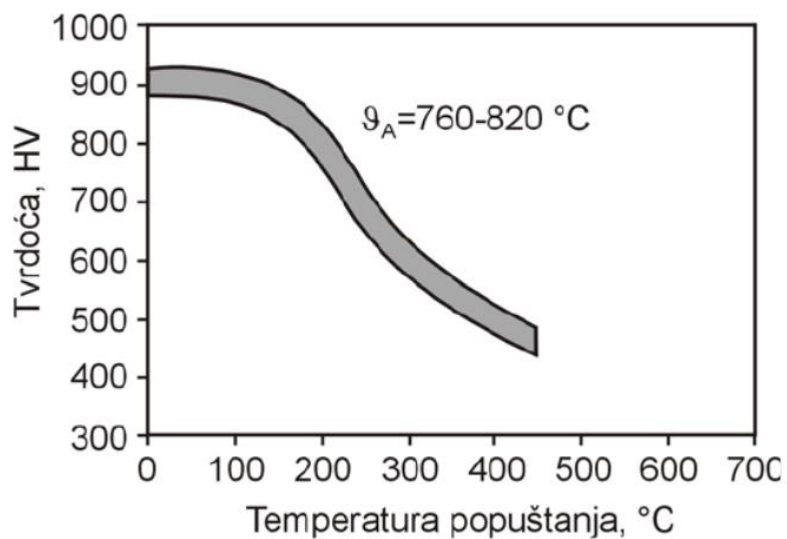
Tablica 4. Podjela nelegiranih alatnih čelika [4]

Kvaliteta skupine	Si [%]	Mn [%]	Pmaks [%]	S maks [%]	Primjer
W 1	0,1 - 0,25	0,1 - 0,3	0,025	0,025	C 100W 1
W 2	0,1 - 0,3	0,1 - 0,35	0,030	0,03	C 125W2 2
W 3	0,15 - 0,4	0,6 - 0,8	0,035	0,035	C 60W 3
WS (za specijalne namjene)	0,25 - 0,4	0,5 - 0,7	0,025	0,025	C 85WS: razne pile C 55WS: čekić, sjekira, kliješta itd.

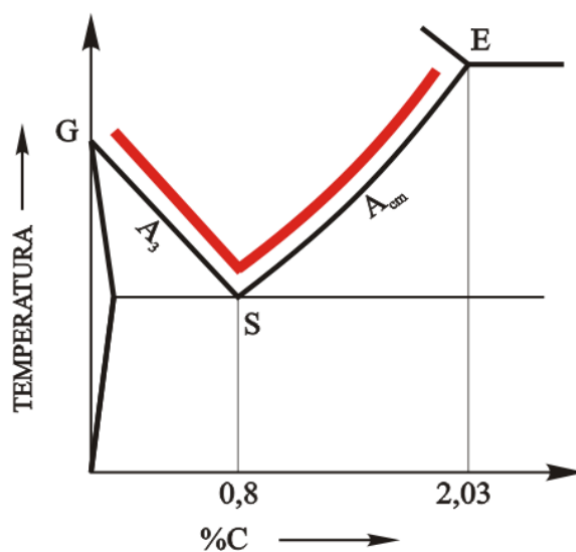
Kvaliteta skupine označava stupanj prokaljivosti; skupina W 3 označava veću prokaljivost u usporedbi sa W 2, ali postoji opasnost od povećanja austenitnog zrna zbog visoke temperature austenitizacije ili predugog držanja na istoj [4].

Ovisno o mikrostrukturi i udjelu ugljika nelegirane alatne čelike možemo podijeliti još na:

- podeutektoidne, postotnog udjela ugljika do 0,8 % → ferlitno – perlitne mikrostrukture
- eutektoidne, postotnog udjela ugljika 0,8 % → perlitne mikrostrukture
- nadeutektoidne, postotnog udjela ugljika većeg od 0,8 % → perlitno – cementitne mikrostrukture [12].



Slika 7. Tvrdoća ugljičnog čelika u ovisnosti o popuštanju [13]



Slika 8. Temperaturno područje austenitizacije (podeutektoidnih, eutektoidnih i nadeutektoidnih) čelika [14]

2.3.2. Niskolegirani alatni čelici za hladan rad

Prva skupina s dodatkom legirnih elemenata nazivaju se niskolegirani alatni čelici za hladan rad postižu znatno bolja svojstva dodavanjem legirnih elemenata: Si, Mn, Cr, W, V i Mo. Legirajućim elementima postiže se dobra žilavost (manja u odnosu na nelegirane (ugljične) čelike), dimenzijska postojanost pri visokim radnim temperaturama, a zadržava se visoka tvrdoća te otpornost na trošenje. Cilj legiranja ove vrste čelika jest postizanje kvalitetnijih karbida u odnosu na Fe₃C karbid te isto tako i povećanje prokaljivosti. Temperatura do koje se popuštaju niskolegirani alatni čelici iznosi 250 °C, a razlog je taj da se izbjegne pojava mogućih pukotina i velikih naprezanja [4]. Kako je i na početku rada navedeno, postoje četiri podskupine ove vrste čelika:

1) Visokouglični W – V čelici

Ova vrsta čelika upotrebljava se kod izrade alata za završnu obradu, poznata pod nazivom OW čelici. Postotni udio ugljika kod ove vrste čelika kreće se između 1,0 % C do 1,45 % C i sadrže od 1 – 4 % W te tako spadaju u skupinu nadeutektoidnih čelika. Namjeni su za rad u hladnom stanju kod alata s jako izraženim abrazivskim trošenjem jer sadrže tvrde karbide koji nisu neotopljeni u martenzitu (npr. M₂₃C₆) [4]. U sljedećoj tablici (Tablica 5) prikazani su primjeri ove vrste čelika i njihovi kemijski sastavi.

Tablica 5. Primjeri visokougličnih W – V čelika s pripadajućim kemijskim sastavom [4]

Oznaka prema DIN standardu	Oznaka prema JUS standardu	C [%]	Cr [%]	W [%]	V [%]
110WCrV5	Č6441	1,1	1,2	1,3	0,2
120WV4	Č4840	1,2	0,2	1,0	0,1
100WV4	Č6842	1,0	0,15	1,15	0,15
142WV13	Č6850	1,45	0,35	3,0	0,25

2) Nisko i srednjeuglični W – Cr – (Si) – V čelici

Ova vrsta čelika upotrebljava se kod izrade alata za rad s udarnim opterećenjima koje je ujedno i osnovno svojstvo zbog sniženog masenog udjela ugljika (od 0,45% C – 0,80 % C). Predviđeni su za rad u hladnom stanju, ali mogu se koristiti kratkotrajno i pri povišenim temperaturama (od 350 °C do 380 °C) zbog dodatka silicija koji utječe pozitivno na takozvanu „krhkosti 300 °C“ tako što pomiče kritičnu vrijednost temperature u više temperaturno područje

popuštanja. Volfram (masenog udjela približno 2 %) i krom (masenog udjela približno 1,1 %) zaslužni su za povećanu prokaljivost i otpornost na trošenje, a rast austenitnog zrna ograničava se vanadijem (masenim udjelom do 0,3 %). Ova podskupina čelika zahvaljujući niskom udjelu ugljika ima vrlo visoku žilavost, a mikrostruktura im se sastoji od zaostalog austenita i martenzita [13].

3) Niskolegirani Cr čelici

Ova skupina alatnih čelika, osim za izradu alata, najčešće se koristi za izradu kotrljajućih ležajeva. Kemijski sastav ove skupne čelika sastoji se od: 1 % do 1,5 % C i 0,5 % do 1,5 % Cr. Zbog niskog udjela kroma nije moguće stvaranje posebnih karbida. Ova skupina alatnog čelika nadeutektoidnog je karaktera, pa se nakon toplinske obrade kaljenja postiže martenzitna struktura sa zaostalim austenitom i karbidom $(Fe,Cr)_3C$. Otopljeni Cr utječe na pojavu zaostalog austenita koji nije poželjan, ali može se ukloniti, tj. izbjeći smanjenjem temperature austenitizacije te zatim tzv. „dubokim hlađenjem“ u tekućem dušiku na temperaturi od $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ [13].

4) Niskolegirani Mn – Cr – W i Mn – Cr – V čelici

U svom kemijskom sastavu ova podskupina alatnih čelika sadrži znatniji postotni udio mangana; gamagenog elementa koji znatno snizuje eutektoidnu temperaturu i povisuje prokaljivost. **Error! Reference source not found.** prikazuje kemijski sastav u kojoj se vidi da navedeni čelici pripadaju skupini nadeutektoida te da pojava austenita nakon kaljenja uzrokovana je prisutnošću mangana. Ova podskupina čelika sklona je razugljičenju te je potrebno toplinsku obradu izvoditi u vakuumu ili nekoj drugoj zaštitnoj atmosferi [13].

Tablica 6. Kemijski sastav nisko-legiranih alatnih čelika (Mn-Cr-V; Mn-Cr-W) [13]

Oznaka prema DIN standardu	Oznaka prema JUS standardu	C [%]	Mn [%]	Cr [%]	W [%]	V [%]
90MnCrV8	Č3840	0,9	2,0	0,4	-	0,1
105WCr6	Č6440	1,05	1,0	1,0	1,15	-

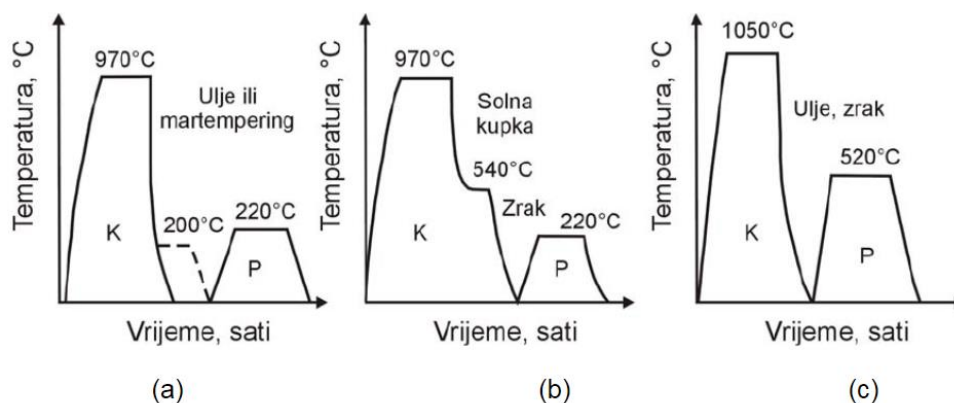
2.3.3. Visokolegirani alatni čelici za hladan rad

Visoko-legirani alatni čelik za hladni rad sadrži udio kroma većeg od 5 % kao legirnog elementa. Cr je ujedno glavni i vrlo važan legirajući kemijski element koji stvara karbine ($(FeCr)_3C$) koji povisuje otpornost na trošenje. Cr također povisuje temperaturu austenitizacije, a osim njega dodaju se i elementi poput molibdena (Mo), volframa (W) i vanadija (V). Što je viši udio kroma u otopini austenita proporcionalno je manji udio ugljika, a otpornost na koroziju raste [7, 13].

S obzirom na svojstva alata ove skupine čelika za hladni rad, njihov kemijski sastav i mikrostrukturu mogu se podijeliti u tri podskupine:

1) Čelici s približno 5 % Cr (npr. X100CrMoV5-1)

Ova podskupina čelika pripada nadeutoktoidnoj vrsti, a kemijski sastav sastoji se od: 1 % C, 5 % Cr, 1 % Mo te 0,25 % V. Navedeni čelik izrazito je dobre otpornosti na trošenje, visoke prokaljivosti, dobre žilavosti te dimenzijske postojanosti tijekom kaljenja. Znatno je teža obrada odvajanjem čestica, ali zato nema deformacija niti anizotropije svojstava. Toplinska obrada najčešće se provodi na temperaturama austenitizacije između 920 °C i 970 °C, zatim kaljenja; gašenja u ulju ili vodi. Ako se zahtjeva što bolja otpornost na trošenje, popuštanja se na temperaturama između 175 °C i 230 °C, a ako je primarni zahtjev žilavost, popuštanje se provodi između 370 °C do 400 °C. Primjeri alata izrađenih od ove podskupine čelika su: mjerni alati, valjci za izradu (narezivanje) navoja, nareznice, narezno svrdlo („gevint borer“), štance, škare i slično [3-5].



Slika 9. Dijagram TO čelika X100CrMoV5-1 [13]

2) Visokouglični ledeburitni alatni čelici s 12 % Cr

Ova podskupina alatnih čelika pripadaju skupini podeutektičkog („ledeburitnog“) sastav. Kemijski sastav sastoji se od 1,5 – 2,0 % C, 12 % Cr te legirnih elemenata Mo, V i W. Mikrostruktura u centru ingota sastoji se od ugljika i eutektičkog karbida, a prema površini je perlitna sa sekundarnim karbidom. Eutektički karbid ne može se razbiti žarenjem. Može se jedino usitniti valjanjem, ali se javljaju anizotropna svojstva. Mehanička svojstva poput žilavosti i čvrstoće viša su u smjeru valjanja, a deformacije ovise o temperaturi austenitizacije i smjeru valjanja. Molibden i vanadij sprječavaju rast austenitnog zrna. Krom karbidi skloni su srašćivanju, ali ne izazivaju porast tvrdoće. Vrlo je osjetljiva toplinska obrada ove podskupine te je potrebno postepeno i pažljivo provoditi ugrijavanje jer ova vrsta čelika ima nisku toplinsku vodljivost i skloni su razugličičenju. Visoke je otpornosti na trošenje u hladnom stanju, neznatne deformacije pri kaljenju i slabe obrade odvajanjem čestica [6]. U sljedećoj tablici prikazani su važniji čelici za izradu alata ove skupine čelika.

Tablica 7. Kemijski sastav značajnijih visoko-ugličnih ledeburitnih čelika [13]

Oznaka prema DIN standardu	Oznaka prema JUS standardu	C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	W [%]
X210Cr12	Č4150	2.0	2.0	12.0	12.0	
X210CrW12	Č4650	2.0	2.0	12.0	12.0	0.7
X165CrMoV12	Č4750	1.7	1.7	12.0	12.0	0.5
X155CrVMo12-1	Č4850	1.6	1.6	12.0	12.0	

3) Martenzitni nehrđajući čelici

Martenzitni nehrđajući (korozijski postojani) alatni čelici sadrže između 0,2 % – 0,1 % C, 13 % – 18 % Cr, 0,5 % – 1,2 % Mo i do 0,1 % V. U usporedbi s drugim nehrđajućim čelicima nemaju tako dobru korozijsku postojanost zbog visokog udjela ugljika, a manjeg udjela kroma. To su legure temeljene na Fe-Cr-C sustavu. Osnovno svojstvo ove vrste alatnih čelika je izvrsna kombinacija dobre korozijske postojanosti, otpornosti na mehanički i toplinski umor, visoke čvrstoće i tvrdoće te otpornosti na trošenje. Mehanička čvrstoća i kemijska postojanost ovise o kemijskom sastavu i provedenoj toplinskoj obradi. Legirni elementi povišuju tvrdoću i

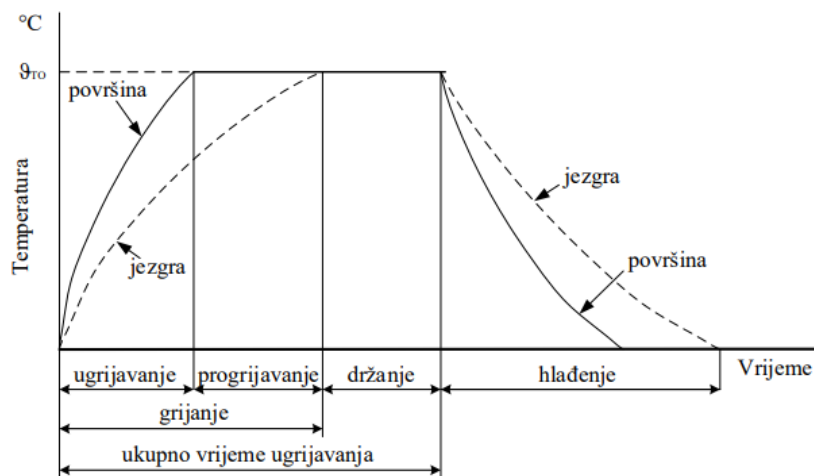
postojanost svojstava na povišenim temperaturama, ali loše utječu na mehanička svojstva ako su prije gašenja otopljeni u austenitu (snižavaju temperaturu martenzitne pretvorbe). Zbog pada korozijske postojanosti i mehaničkih svojstava ne koriste se temperaturama većim od 650 °C. Primjeri alata koji se izrađuju od ove podskupine čelika su: medicinski instrumenti (škare, skalpeli, kliješta i sl.), žileti, noževi, žigovi, itd [6, 13].

2.4. Toplinska obrada alatnih čelika za hladni rad

Kako bi se što kvalitetnije proizveo potreban alat, uz pravilan izbor materijala potrebno je uzeti u obzir i odgovarajuću toplinsku obradu. Toplinska obrada je kombinacija postupaka u kojima se predmet (obradak) namjerno izlaže toplinsko – vremenskim ciklusima kako bi se zadovoljila tražena svojstva (fizička, mehanička i kemijska), a time i željena mikrostruktura. Od alatnih čelika uglavnom se očekuje što duži vijek trajanja uz minimalno održavanje te zato treba pripaziti od samog početka kod:

- oblikovanja alata (veličina poprečnog presjeka, izbjegavati ureze te oštre bridove, masa dijela da je simetrično raspoređena i sl.)
- izbora alatnog čelika (na osnovi zahtijevanih svojstava u eksploataciji i tolerancija, karakteristika sirovca,
- te same toplinske obrade [15].

Prije toplinske obrade mora se definirati kojim će se postupkom zadovoljiti odgovarajuća struktura te svojstva, a to će se ostvariti poznavajući zahtjeve alata. Toplinska obrada sastoji se od višestrukog ugrijavanja i gašenja (hlađenja) kako bi se poboljšala struktura, a samim time i svojstva materijala. Na dijagramu postupka (Slika 10) može se vidjeti ovisnost temperature o vremenu. Temperatura (ϑ) i vrijeme; trajanje (t) su ujedno i osnovni parametri toplinske obrade [3, 8].

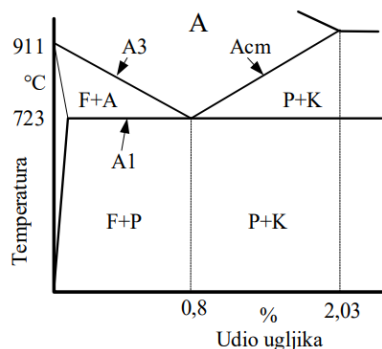


Slika 10. Opći (osnovni) dijagram postupka toplinske obrade [3]

Iz prošlog dijagrama mogu se opisati sljedeći parametri:

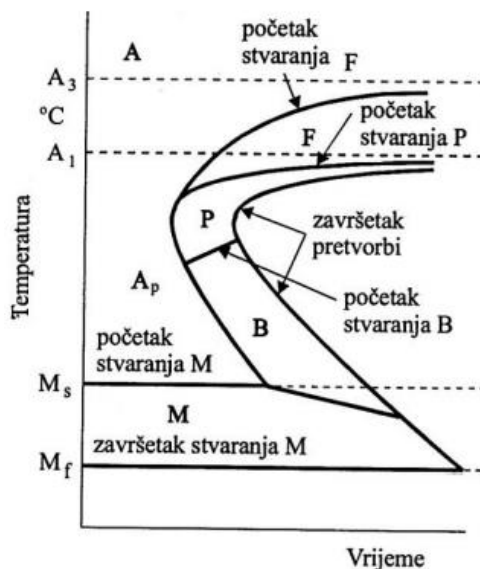
- temperatura toplinske obrade; ϑ_{TO} [°C]
- vrijeme grijanja sastoji se ugrijavanja (potrebnog vremena da površinski sloj postigne temperaturu ϑ_{TO}) i progrijavanja (potrebnog vremena da jezgra postigne temperaturu ϑ_{TO})
- ukupno vrijeme ugrijavanja je suma trajanja grijanja i držanja na ϑ_{TO}
- vrijeme hlađenja je zapravo vrijeme potrebno da se temperature površine i jezgra predmeta ne izjednače; tj. ohlade na zadanu (sobnu) temperaturu [3].

Slika 11 prikazuje isječak Fe – Fe₃C dijagrama koje je vrlo važan za toplinsku obradu alatnih čelika. A1 temperatura (723 °C); temperatura na kojoj se pri zagrijavanju perlit transformira u austenit, a pri hlađenju obratno. Temperatura A3 koja pri zagrijavanju označava završetak transformacije ferita u austenit, a pri ohlađivanju početak transformacije austenita u ferit [3].



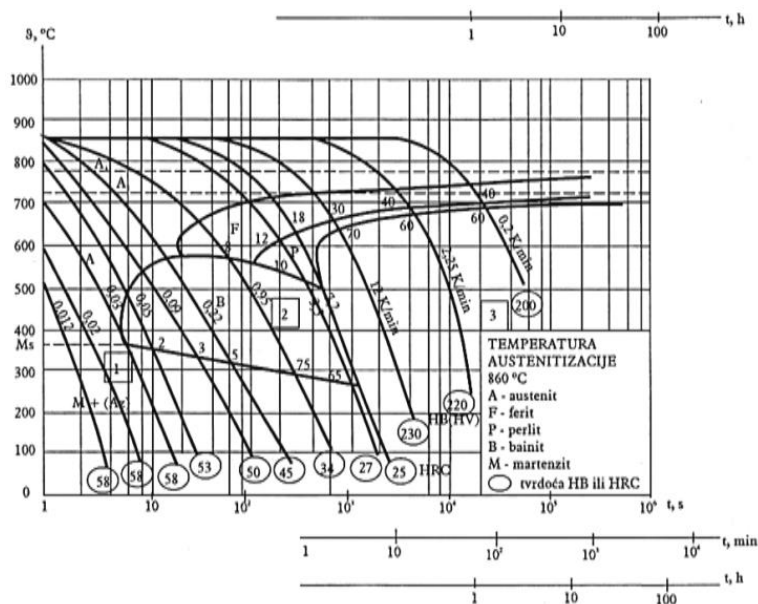
Slika 11. Isječak Fe – Fe₃C dijagrama; A (austenit), F (ferit), P (perlit), K (karbid) [3]

Sljedeći važan dijagram koji prikazuje nastanak pretvorbi u mikrostrukтури pri raspadu austenita zbog različitih brzina hlađenja je TTT dijagram (Slika 12).

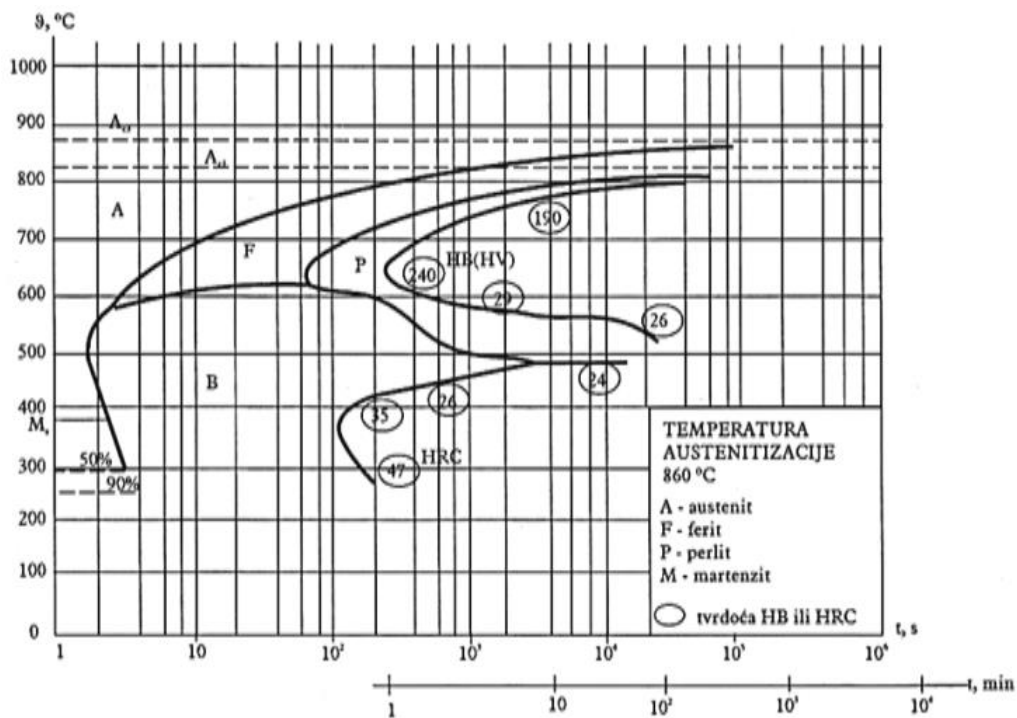


Slika 12. TTT (engl. „Time – temperature – transformation“) dijagram; A – austenit; M – martenzit; B – bainit; P – perlit; F – ferlit [3]

Razlikujemo dvije vrste TTT dijagrama; kontinuirani i izotermički. Kod kontinuiranog TTT dijagrama austenitna pretvorba prati se uz kontinuirano hlađenje, a kod izotermičkog dijagrama austenitna pretvorba prati uz držanja na određenim temperaturama (Slika 13, Slika 14) [3].



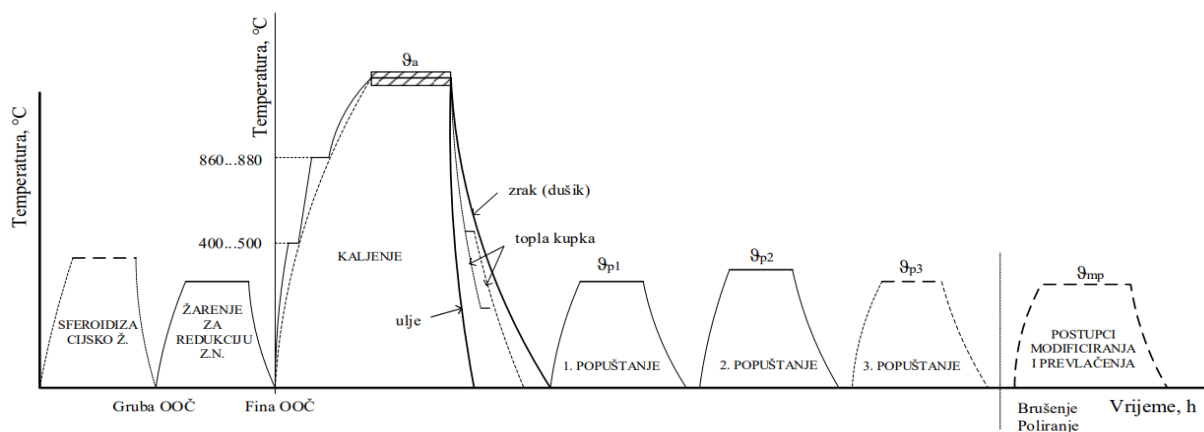
Slika 13. Kontinuirati TTT dijagram (42CrMo4) [3]



Slika 14. Izotermički TTT dijagram (42CrMo4) [3]

Uobičajen slijed postupaka toplinske obrade može se sistematizirati kao što je prikazano na slici (Slika 15):

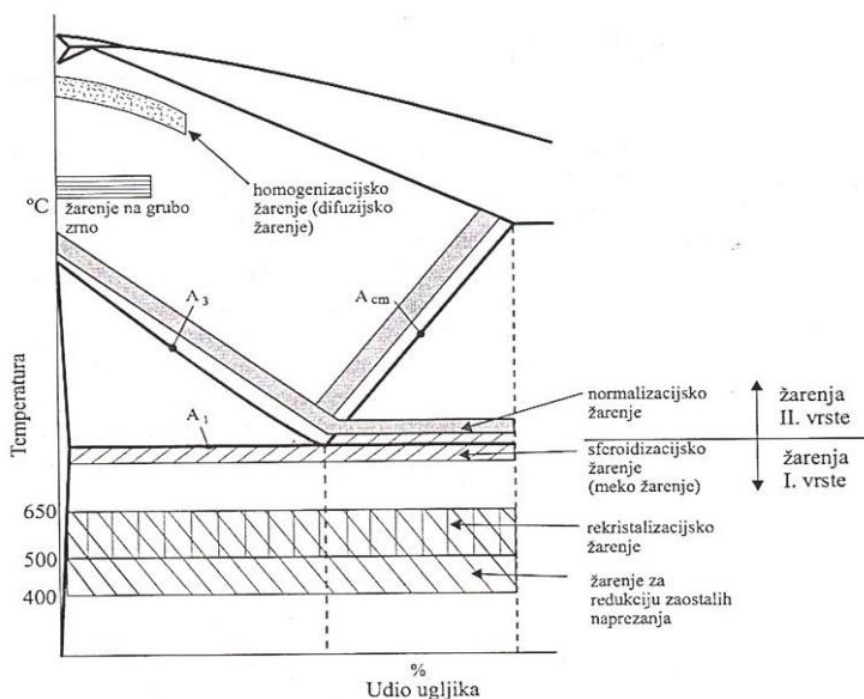
- 1) žarenje
- 2) kaljenje
- 3) popuštanje (višestruko po potrebi)
- 4) naknadno modificiranje i prevlačenje [16].



Slika 15. Opći slijed toplinske obrade alata [16]

2.4.1. Postupci žarenja

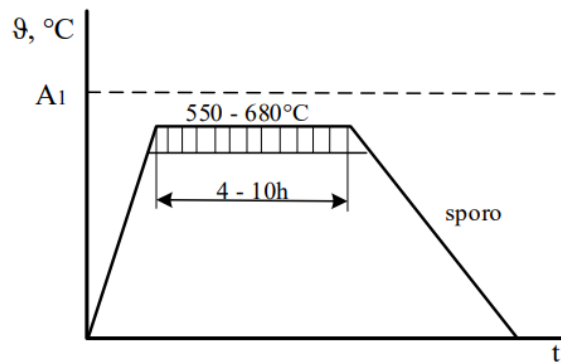
Žarenje se provodi s ciljem vraćanja metala u ravnotežno stanje. Primjerice žarenjem podeutektoidnog čelika vraćaju se stabilne faze perlita i ferita. Na taj način se ukidaju zaostala naprezanja (uspostavlja se mehanička ravnoteža). Slika 16 prikazuje žarenje I. i II. reda te njihove podvrste. Temperatura na kojoj se provodi žarenje I. reda nalazi se nešto ispod temperature granice A_1 te nakon hlađenja (na zraku) ne dolazi do promjene kristalne rešetke (prekristalizacije). Nešto iznad temperature A_1 ili oko nje se provodi žarenje II. vrste kod kojeg dolazi do prekristalizacije; tj. strukturnih promjena kristalne rešetke [3].



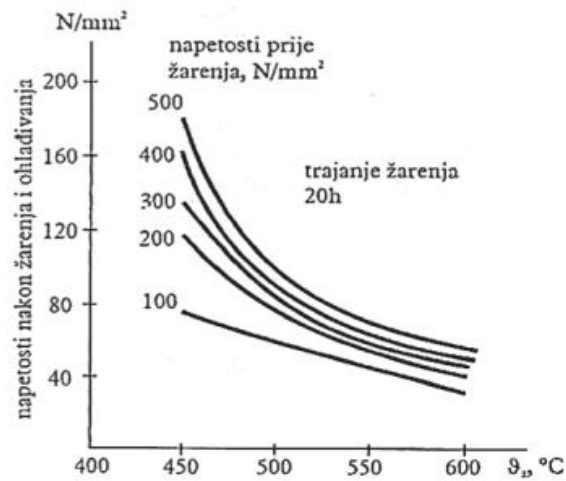
Slika 16. Slikoviti prikaz temperaturnih područja različitih vrsta žarenja [3]

U nastavku će se opisati postupci žarenja koji se tiču alatnih čelika za hladni rad:

- **Žarenje za redukciju zaostalih naprezanja** → „Žarenje za redukciju napetosti je žarenje pri dovoljno visokoj temperaturi (ispod A_1) sa sporim hlađenjem u cilju redukcije zaostalih naprezanja, a da se pri tome ostala svojstva bitno ne promijene.“ Razlozi zbog koji nastaju naprezanja te zbog koji treba provoditi ovakvu vrstu žarenja su: hlađenje nakon kovanja, pri hladnom oblikovanju deformiranja ili nakon grube strojne obrade (obrade brušenja, tokarenja ili slično) [15].

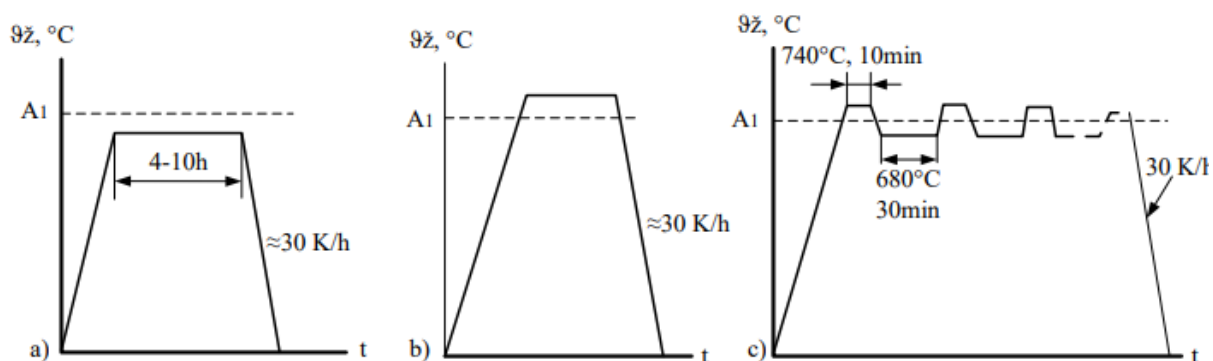


Slika 17. Dijagram žarenja za redukciju zaostalih naprezanja [3]



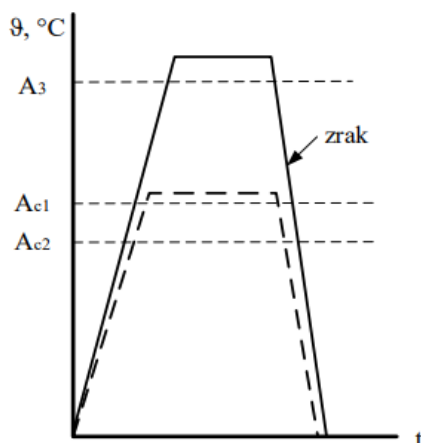
Slika 18. Usporedba naprezanja u materijalu prije i poslije žarenja [3]

- **Sferodizacijsko (meko) žarenje** → svrha žarenja je oblikovanje lamelarnih ili mrežastih oblika karbida u kuglasti zbog postizanja strukture koja je lakše obradiva odvajanjem čestica te olakšava se oblikovanje deformiranjem kod svih vrsta čelika. Žarenje se izvodi na ili oko temperature A_1 s određenim držanjem pri toj temperaturi [3].

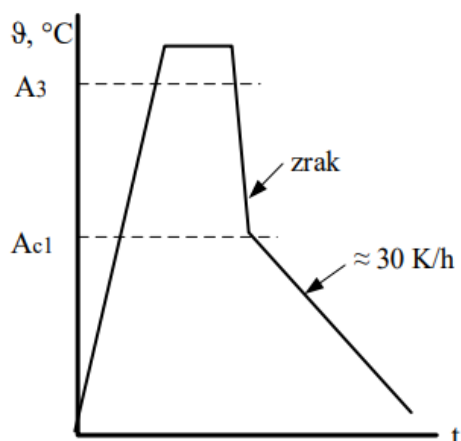


Slika 19. Dijagrami provođenja sferodizacijskog žarenja; a) ispod A_1 ; b) iznad A_1 ; c) oko temperature A_1 [3]

- **Normalizacijsko žarenje** → normalizacija; može se definirati kao postupak koji se sastoji od austenitizacije (zagrijavanja) i hlađenja na zraku zbog postizanja što jednoličnije i sitnozrnate mikrostrukture (kod podeutektoidnih čelika je to P + F, a kod nadeutektoidnih P+K). Na normalizacijsko žarenje utječu parametri poput: brzine zagrijavanja, temperature austenitizacije, trajanja austenitizacije (držanja pri toj temperaturi) te brzine hlađenja. Na sljedećim dijagramima prikazano je kontinuirano (Slika 20) te usporeno (Slika 21) hlađenje kod normalizacijskog žarenja [3].



Slika 20. Dijagram kontinuiranog hlađenja kod normalizacije čelika [3]



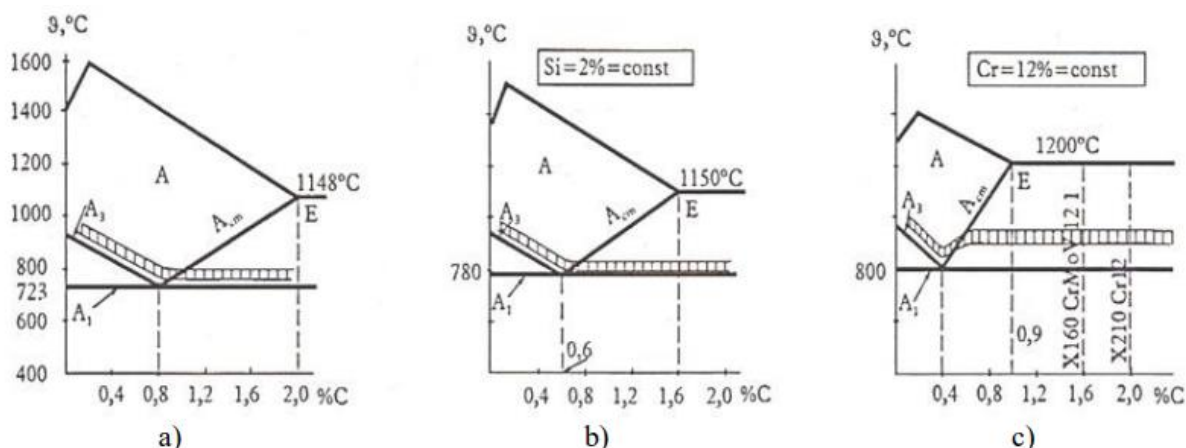
Slika 21. Dijagram usporenog hlađenja kod normalizacije čelika [3]

2.4.2. Postupak kaljenja alatnih čelika

Prvi korak kod postupka kaljenja je ugrijavanje čelika na temperaturu austenitizacije. Zbog velike vjerojatnosti postojanja zaostalih napreznja kod alatnih čelika te kako bi se smanjila mogućnost nastanka novih napreznja, ovu vrstu alata potrebno je sporo (postupno zagrijavati) ili predgrijavati čak nekoliko puta na slijedeći način:

- I. predgrijavanje** - na temperaturu od 400 °C do 500 °C (vrijedi za sve vrste čelika od kojih se izrađuje alat)
- II. predgrijavanje** – na temperaturu od 860 °C do 880 °C (vrijedi za čelike s temperaturom austenitizacije od 960 °C do 1150 °C; visoko-legirani alatni čelici)
- III. predgrijavanje** – na temperaturu do 1050 °C; za brzorezne čelike s temperaturom austenitizacije većom od 1200 °C [15].

Predgrijavanja se vrše kako bi se izbjegao mogući „toplinski udar“, tj. kako bi se izbjegla visoka temperaturna razlika između jezgre alata i njegove površine. Na taj način smanjuje se mogućnost pojave pukotine u jezgri alata [15]. Slika 22 prikazuje izbor optimalne temperature austenitizacije za različite kvalitete čelika:



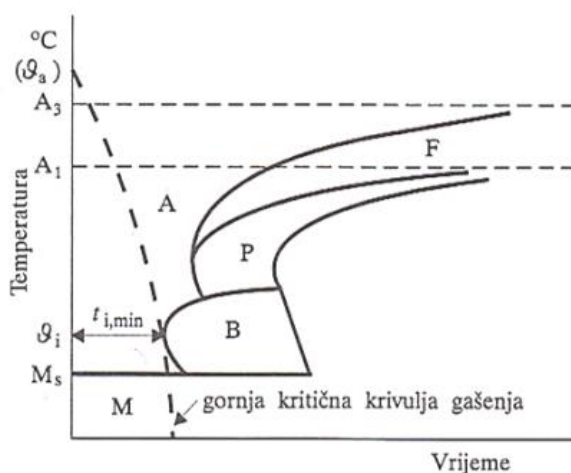
Slika 22. Optimalan izbor temperature austenitizacije za: a) ugljične (nelegirane) čelike, b) podeutektoidne (nisko-legirane) čelike, c) nadeutektoidne (visoko-legirane) čelike [3]

Gašenjem čelika s temperature austenitizacije dolazi do transformacije austenita u martenzit. Taj proces prati se u kontinuiranom TTT dijagramu. Da bi se postigla potupna martenzitna struktura, potrebno je odrediti odgovarajuću brzinu gašenja. Gornju kritičnu brzinu – to je najmanja brzina hlađenja kod koje se dobiva 100 % martenzitna struktura [3]. Gornja kritična brzina gašenja računa se prema izraz:

$$v_{kg} = \frac{\vartheta_a - \vartheta_i}{t_{i,min}} \quad 2.1$$

gdje je:

- v_{kg} – gornja kritična brzina hlađenja
- ϑ_a – temperatura austenitizacije
- ϑ_i – temperatura najkraćeg trajanja inkubacije pothlađenog austenita
- $t_{i,min}$ – minimalno vrijeme trajanja inkubacije pothlađenog austenita [3, 17].



Slika 23. Kvalitativan prikaz određivanja gornje kritične brzine hlađenja [17]

Prema dimenzijama i svojstvima predmeta određuje se vrijednost kritične brzine hlađenja te vrijedi sljedeće:

- za kritične brzine veće od 150 °C/s ($v_{kg} > 150 \text{ °C/s}$) gašenje se provodi u vodi
- za kritične brzine manje od 150 °C/s i veće od 5 °C/s ($150 \text{ °C/s} > v_{kg} > 5 \text{ °C/s}$) gašenje se provodi u toploj kupki ili u ulju (uljna emulzija)
- za kritične brzine manje od 5 °C/s ($v_{kg} < 5 \text{ °C/s}$) gašenje se provodi na zraku ili inertnom plinu [17].

2.4.3. Duboko hlađenje

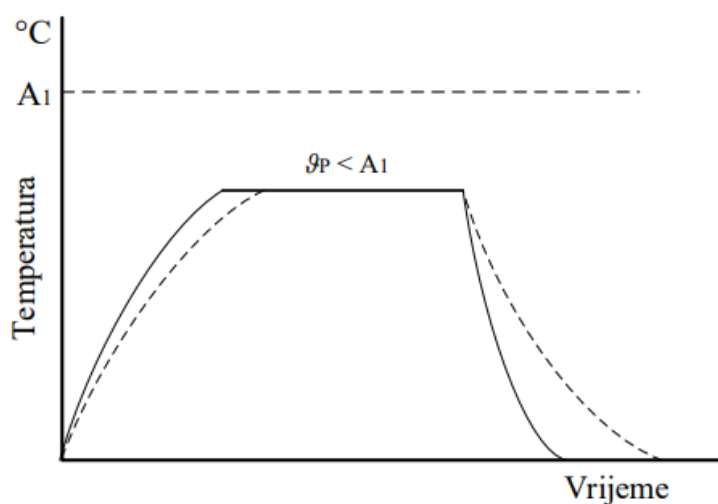
Duboko hlađenje je dio postupka toplinske obrade koji se provodi po potrebi nakon završetka martenzitne pretvorbe u čeliku. Rashladna sredstva koja se koriste kod ovog postupka su: tekući dušik (najčešće), kisik, helij, neon ili vodik. Postupak se provodi na vrlo niskim temperaturama (sve do -196 °C) pomoću jednog od navedenog rashladnog sredstva. Brzina hlađenja ne smije biti velika ($< 5 \text{ °C/min}$), a trajanje procesa (dubokog hlađenja) procjenjuje se između 12 do 84 sati. Ovim postupkom povećava se značajna količina martenzita u strukturi, što isto tako dovodi do smanjenja krhkosti, povećanja tvrdoće te bolje dimenzijske stabilnosti [15, 18].

2.4.4. Popuštanje čelika

Čelik nakon kaljenja je vrlo tvrd, krhak i sadrži puno zaostalih naprezanja. Kako bi se poboljšala ta svojstva potrebno je pravilno provesti popuštanje; odrediti brzinu ugrijavanja, temperaturu i trajanje popuštanja. Slika 24 prikazuje opći dijagram postupka popuštanja. To je zapravo postupak ugrijavanja već toplinski obrađenog (zakaljenog) čelika. Popuštanje se provodi na temperaturama između 20 °C i A_1 temperature. Nakon postupka popuštanja dolazi do redukcije (prosječnog smanjenja) postotnog udjela ugljika u martenzitu (na približno 0,25 %C), zaostali austenit pretvara se u martenzit te stvaraju se karbidi koji su nastali uslijed popuštanja martenzita. U sljedećoj tablici (Tablica 8) prikazana je podjela popuštanja prema temperaturnom području [3, 15].

Tablica 8. Temperaturna podjela popuštanja [15]

Vrsta popuštanja	Temperaturno područje, ϑ_p [°C]	Primjena
Nisko	do 220	-nisko-legirani alatni čelici za hladni rad -visoko-legirani alatni čelici za hladni rad -kaljeni čelici
Srednje	220 - 450	-čelici za opruge
Visoko	od 450 do A_1	-alatni čelici za topli rad -brzorezni čelici



Slika 24. Dijagram postupka popuštanja čelika [3]

3. VAKUUMSKA PEĆ

3.1. Vakuum

Pojam vakuum potječe od latinske riječi što znači prazan prostor ili u tehničkom smislu vakuum se može smatrati prostorom s vrlo malom gustoćom zraka, a nastaje uklanjanjem zraka (i ostalih prisutnih plinova) iz hermetički zatvorenog prostora ili posude pomoću vakuumske sustava crpljenja. Kvaliteta vakuuma opisuje se stupnjem smanjene gustoće zraka te tako postoje tri vrste kvalitete vakuuma za obradu čelika – gruba, fina i visoka kvaliteta obrade (Tablica 9) [19].

Tablica 9. Vrste vakuuma

Vrsta vakuuma	p, mbar	Primjena kod TO
Grubi vakuum	1000 do 1	nelegirani čelici
Srednji vakuum	1 do 10^{-3}	nehrđajući i legirani alatni čelici
Visoki vakuum	10^{-3} do 10^{-7}	nehrđajući čelici (legirani Ti), alatni prevučeni CVD prevlakama

Svrha toplinske obrade čelika u vakuumu jest da se zaštiti od površinske oksidacije. Vrsta i debljina oksida ovisi o vrsti čelika i temperaturi austenitizacije čelika te o trajanju izloženosti toplinske obrade. Postoji više mogućnosti izbjegavanja površinske oksidacije. Vrući zrak unutar vakuumske peći mora biti zamijenjen atmosferskim koji ne sadrži kisik. Jedna od metoda je uporaba dušika (N_2) kao inertne zaštitne atmosfere, a druga da se upotrijebi dušik u kombinaciji s reducirajućim elementima kao što su ugljični monoksid (CO) i vodik (H_2). Obje metode zahtijevaju uklanjanje kisika unutar peći te se tako dobiva visoka čistoća i metalni sjaj toplinskih obrađenih površina bez pojave uključaka i oksida. Također nakon toplinske obrade nema pojave razugljičenja. Vakuumskom toplinskom obradom mogu se provoditi gotovo svi procesi toplinske obrade (primjerice kao što su žarenje, cementiranje, kaljenje, nitriranje). Može se također provoditi i gašenje [19]. Uređaji sa kojima se postiže vakuum su:

- difuzijska pumpa
- mehanička rotacijska pumpa

- ionska pumpa
- turbomolekularna pumpa
- sublimacijska pumpa
- kriogenska pumpa [20].

3.1.1. Oprema vakuumskih peći

S obzirom na dizajn peći, iznos vakuuma te kontrolu temperature, toplinska obrada u vakuumskim pećima karakteriziraju posebni uvjeti. Glavni dijelovi peći su: upravljačka ploča, komora, sustav sa pumpom za crpljenje vakuuma, takozvana vruća zona i sustav hlađenja [19].

3.1.1.1. Komore vakuumske peći

Komore se mogu grupirati u takozvane komore sa vrućim zidovima i komore sa hladnim zidovima. Obično peći sa vrućim zidovima su izrađene od metala ili keramike ovisno o temperaturama i imaju brzi odziv. Sustav grijanja sastoji se od grijača ili indukcijske zavojnice koji su smješteni unutar komore. Jedino ograničenje kod ovakvih tipova peći za toplinsku obradu su dimenzijska; dimenzije prostora u koji se postavlja predmet koji se želi toplinski obraditi. Toplinska obrada u industriji zahtjeva više temperature, niže tlakove, veće brzine ugrijavanja i hlađenja te veću stopu proizvodnje. Tako su vakuumske peći sa hladnim zidovima postale dominantne od kasnih 1960. godina. Kod peći s hladnim zidovima, vakuumska komora se hladi s rashladnim medijem (uglavnom vodom) te se na taj način zadržava oko temperature okoline tijekom rada na visokim temperaturama. Prednosti takozvane peći s hladnim zidom su:

- veće radne temperature (od 1315 °C do 1650 °C)
- manji gubitak topline i manje toplinsko opterećenje okoline
- mogućnost bržeg zagrijavanja i hlađenja
- bolja mogućnost konstante kontrole temperature [19].

Sustav s pumpom za crpljenje vakuuma ovisi o:

- volumenu komore
- površini komore i vrsti materijala unutrašnjih dijelova peći
- otpuštanje radnog opterećenja
- potrebno vrijeme od početnog do konačnog tlaka [19].

Važno je da sustav za vakuum održava konstantnu razinu tlaka u proces te da ne dođe do iscrpljenosti zbog radnog opterećenja. Sustavi su obično podijeljeni na dva podsustava; pumpe za grubi vakuum i pumpe za visoki vakuum [19].

3.1.1.2. Sustav grijanja

Općenito, elementi za sustav grijanja u vakuumskim pećima izrađeni su jednim od sljedećih materijala:

- legure nikla i kroma koje se mogu koristiti do 1150 °C, iznad 800 °C mogućnost isparavanja kroma
- silicijev karbid s maksimalnom radnom temperaturom do 2200 °C, mogućnost isparavanja silicija pri visokim temperaturama i niskom vakuumu
- molibden s maksimalnom radnom temperaturom do 1700 °C, lomljiv pri visokim temperaturama i osjetljiv na vlagu i izlaganje kisika
- grafit s maksimalnom radnom temperaturom do 2000 °C, čistoćom grafita se povećava i temperatura
- tantal s maksimalnom radnom temperaturom od 2400 °C, lomljiv na visokim temperaturama, povećane osjetljivosti na kisik i vlagu [19].

Rezultat toplinske obrade uvelike ovisi o ujednačenosti temperature tijekom cijelog procesa. Sustav grijanja nakon što postigne zadanu temperaturu, trebao bi održavati jednoliku tu temperaturu u toleranciji od ± 5 °C (ili manje). Zagrijavanje se izvodi zračenjem te neke vakuumске peći imaju i posebne ventilatore za dovod inertnih plinova. Pomoću temperaturnih senzora mjeri se temperatura unutar komore. Na taj način dobivaju se informacije o unutrašnjoj temperaturi, a samim time omogućuje se točno vrijeme zagrijavanja i držanja na temperaturi toplinske obrade [19].

3.1.1.3. Kontrolni sustav

Jedan od zahtjeva industrijskih vakuumskih peći je ponovljivost u smislu postizanja određenih mehaničkih svojstava kao što je to tvrdoća uz minimalnu potrošnju energije. Zbog toga su sustavi kontrolirani mikroprocesorom postao neophodni za zadovoljavanje ovog zahtjeva [19].

3.1.1.4. Sustav hlađenja

Mediji koji se koriste kao sredstva za hlađenje komponenata u vakuumskim pećima su:

- subatmosfersko hlađenje sa inertnim plinom (obično Ar ili N₂)
- tlačenje pod tlakom (do 20 bara ili više) s cirkulirajućim plinom (Ar, N₂, He, H₂ ili smjese tih plinova)
- ulje [20].

Nakon zagrijavanja u vakuumu, tijekom hlađenja mora se održavati dovoljno čista i svijetla površina komponenata. Danas, najčešći plin korišteni kao rashladno sredstvo je dušik zato što je jeftin i relativno siguran [20].

3.1.2. Postupci toplinske obrade u vakuumskim pećima

U vakuumskim pećima mogu se izvoditi različiti postupci toplinske obrade kao što su: žarenje, kaljenje, žarenje legura koji otvrdnjavaju precipitacijom, pougljičavanje, sinteriranje, nitriranje u plazmi i dr. Tim postupcima znatno se poboljšavaju svojstva materijala. U nastavku slijedi opis pojedinih postupaka toplinske obrade u vakuumskim pećima:

3.1.2.1. Žarenje i popuštanje

Žarenje se provodi primarno zbog omekšavanja materijala, popuštanje zaostalih naprezanja te poboljšanje strukture zrna na način da dovedemo izradak na potrebnu temperaturu, zatim ga držimo pri toj temperaturi određeno vrijeme i na samom kraju hladimo (gasimo) unaprijed određenom brzinom. Žarenjem u vakuumskim pećima dobivamo izratke visoke čistoće.

Popuštanje se provodi u svrhu uklanjanja nastalih naprezanja u krajnjim fazama proizvodnje kako bi se izbjeglo moguće savijanja ili izvijanja dijelova. Takva naprezanja obično nastaju nakon zavarivanja, nakon hladno deformiranim dijelovima, nakon lijevanja ili grube obrade i slično [21].

Tablica 10. Temperature popuštanja [21]

	Temperatura; °C
Niskolegirani čelik	550-650
Alatni čelik	600-750
Al-legure	200-350
Ni-legure	480-1200
Cu- legure	150-350
Ti-legure	480-815

3.1.2.2. Gašenje

Temeljna svrha kaljenja je postizanje maksimalne tvrdoće koju čelik može ostvariti, a to ovisi o postotnom udjelu ugljika u čeliku. Postupak se sastoji od zagrijavanja čelika na temperaturu austenitizacije, držanja pri toj temperaturi dok ne dobijemo austenitnu mikrostrukturu i zatim gašenja kako bi dobili martenzitnu mikrostrukturu. Jedna od značajki kaljenja u vakuumskim pećima je nizak tlak iznad ulja, što uzrokuje naglo isparavanje ulja. Isparavanje ovisi o količini zraka ili dušika koje ulje apsorbira tijekom punjenja i pražnjenja peći. Vakuumska ulja pokušavaju to svesti na minimum. Ulja za vakuumsko gašenje se destiliraju i dovode do veće čistoće u usporedbi sa drugim uljima što rezultira i boljim izgledom kaljene površine dijelova nakon procesa [19].

3.1.2.3. Gašenje plinom

Danas je sve više zastupljenija metoda kaljenja visokotlačnim gašenjem u plinu zbog veće produktivnosti; kod vakuumskih peći smanjuje se vrijeme trajanja ciklusa i radi se na poboljšanju metalurške primjene. Vakuumske peći omogućuju ne reaktivne uvjete za obrađene materijale koji žele osigurati optimalna željena svojstva (npr. kao što su alatni čelici) [19].

3.1.2.4. Vakuumsko lemljenje

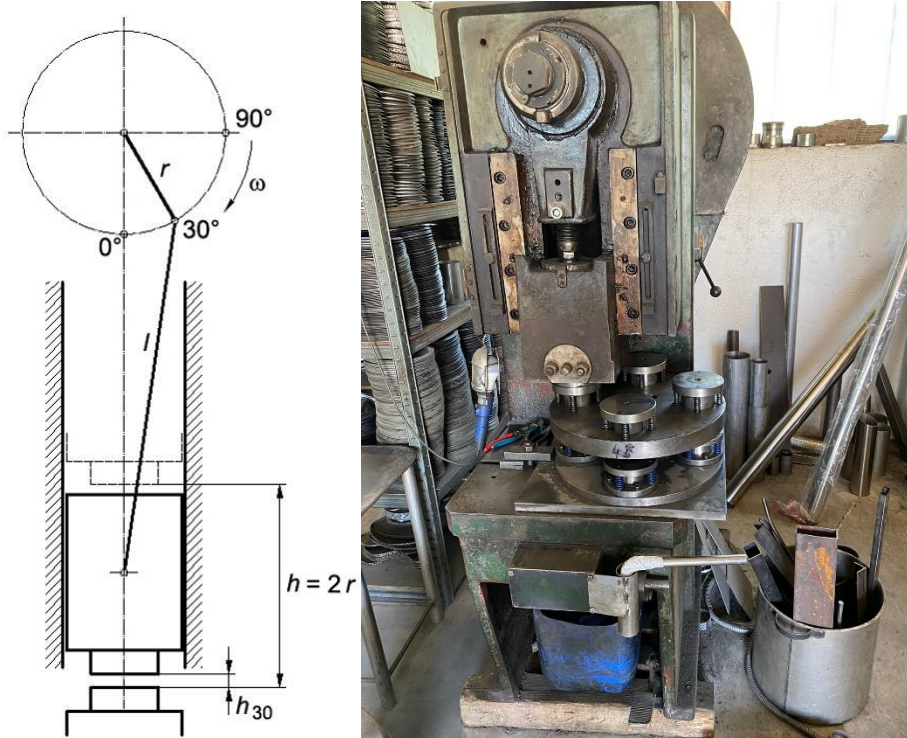
Vakuumsko lemljenje danas se koristi u masovnoj proizvodnji za spajanje različitih materijala kao što su čelik, aluminij i dr. Prometna industrija dala je poticaj sve većoj uporabi vakuumskih peći za lemljenje zbog proširenja lakih materijala visoke čvrstoće poput titana. Razvojem legura otpornih na toplinu koje sadrže aluminij i titan, a koje je bilo vrlo teško ako ne i nemoguće lemiti na atmosferskom tlaku, u vakuumskoj peći našli su komercijalnu primjenu. Danas je veoma širok izbor materijala poput čelika, lijevanog željeza, nehrđajućih čelika, aluminijskih, titana, legura nikla i toplinski otpornih legura na bazi kobalta koji se uspješno lemi. Izbjegavaju se materijali koje sadrže elemente niskog tališta [19].

3.1.2.5. Sinteriranje

Vakuumske peći koriste sve širi spektar primjene materijala, tako i materijale metalnih prahova. Prah se zagrijava na temperaturu koja ne premašuje taljenje osnovnog materijala, ali opet na dovoljno visoku da se zrnca praha spoje (priljube) i zajedno dobivaju veći volumen. Ograničenje primjene sinteriranja u vakuumskim pećima je tlak pare metala na temperaturi sinteriranja. Ako je tlak pare sličan radnom tlaku u vakuumskoj peći, doći će do znatnog isparavanja ako se ne koristi dovoljno visok tlak čistog inertnog plina. U nekim slučajevima plin s djelomičnim tlakom reagirat će s površinom stvarajući sloj koji bi trebalo ukloniti [19].

4. EKSCENTAR PREŠA

Slika 25 prikazuje ekscentar prešu na koju je ugrađen rotirajući stol s alatima koji su tema ovog rada. Primarno se ovakva vrsta preše koristi za kovanje malih izmjera, a sastoji se od vratila (ekscentar vratilo), klipnjače te bata koji je spojen na klipnjaču. Kružno gibanje vratila na kojem je smješten zamašnjak pokreće se pomoću elektromotora. Daljnji prijenos pretvara kružno gibanje u pravocrtno, a pokreće se ručnim pritiskom na papučicu [22]



Slika 25. Ekscentar preša na kojoj se primjenjuje alat za ispušne sisteme [22]

5. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu provede će se ispitivanja raznih postupaka toplinskih obrada kako bi se odredila optimalna svojstva za visoko-legirani ledeburitni Cr – V alatni čelik s dodatkom Mo. Slika 26 prikazuje početno (sirovo) stanje iz kojeg se je izradio alat.

Iz trake sirovog (osnovnog; Slika 27) komada čelika nakon postupaka obrade odvajanja čestica; glodanja i bušenja, izrezani su uzorci na tračnoj pili. Zbog što preciznijih usporedbi među provedenim toplinskim postupcima, izrađeno je 8 identičnih uzoraka dimenzija 18 x 18 x 9.5 mm. Prije samog postavljanja u peć, uzorci su numerički označeni radi lakšeg i jednostavnijeg raspoznavanja istih u daljnjim postupcima koji slijede. Svi uzorci kaljeni su istovremeno u vakuumskoj peći. Na samome kraju provedeno je i provjereno ponašanje alata u eksploatacijskim uvjetima u pogonu.



Slika 26. Sirovi komad za tokarenje od čelika X155CrVMo12-1



Slika 27. Komad čelika X155CrVMo12-1 od kojih su izrađeni uzorci

5.1. X155CrVMo12 – 1; (OCR12VM)

Visoko-legirani ledeburitni alatni čelik za hladni rad, DIN oznake materijala 1.2379; poznat još pod standardnim nazivima : AISI: D2, NF: Z160CDV12, EU: 160CrMoV 12 1 (Tablica 11).

Tablica 11. Standardne oznake čelika X155CrVMo12-1 u svijetu [23]

SR Njemačka		USA	Francuska	Italija
DIN 17007	DIN 17006	AISI	AFNOR	UNI
1.2379	X155CrVMo 12-1	D2	Z160CDV12	UX150CrMo12 KU

Približan kemijski sastav ove vrste čelika sastoji se od 1,55 % C (ugljika), 0,25 % Si (silicija), 0,3 % Mn (mangana), 12 % Cr (kroma), 0,9 % Mo (molibdena) te 1 % V (vanadija); to je visoko-legirani ledeburitni Cr – V alatni čelik s dodatkom Mo (Tablica 12).

Tablica 12. Kemijski sastav čelika X155CrVMo12-1 [23]

Oznaka prema DIN standardu	Oznaka prema JUS standardu	C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	W [%]	Mo [%]	V [%]
X155CrVMo12-1	Č4850	1,55	0,25	0,3	12,0	-	0,9	1,0

Glavna svojstva ovog čelika su visoka tlačna čvrstoća i žilavost te velika otpornost trošenju. Kombinacijom tih karakteristika ovaj čelik ima široku upotrebljivost. Isto tako, zbog tih karakteristika i dimenzijske stabilnosti kod ovog čelika otvara se mogućnost dodatnog povećanja otpornosti trošenju nitriranjem; nitriranje tenifer postupkom. Razlog tome je efekt sekundarne tvrdoće jer osnovna tvrdoća čelika se ne smanjuje pri nitriranju. Ima jako izražen efekt sekundarne tvrdoće i može se koristiti u izradi alata za rad u vrućem stanju. Područje primjene ovog alatnog čelika vrlo je široko. Može se koristiti u izradi alata za istiskivanje, valjanje vijaka, alata kao izbacivač, kod raznih strojnih noževa te drugih alata s jako opterećenim rubovima kao što će biti alat iz ovog rada [23].

Neka od osnovnih toplinskih svojstava pri sobnoj temperaturi (20 °C) visoko legiranog ledeburitnog alatnog čelika (X155CrMoV12 – 1) su:

- toplinska vodljivost: $\lambda = 20 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
- gustoća: $\rho = 7,7 \text{ g/cm}^3$
- modul elastičnosti: $E = 210 \text{ kN/mm}^2$
- specifični toplinski kapacitet: $c = 0,46 \text{ J/g}\cdot\text{K}$ [23].

U sljedećoj tablici prikazani su koeficijenti linearnog toplinskog širenja pri različitim temperaturama (brzina zagrijavanja iznosi 5 °C/min – to je meko žareno stanje):

Tablica 13. Koeficijenti linearnog toplinskog širenja [23]

Temperatura [°C]	20 do 100	20 do 200	20 do 300	20 do 400	20 do 500	20 do 600	20 do 700	20 do 800
Koeficijent [$\frac{10^{-6}}{^{\circ}\text{C}}$]	9,8	11,7	12,1	12,8	12,9	13,0	13,2	13,5

Kako bi se odabrao optimalan postupak toplinske obrade za alat, za ispitivanje je korišteno 8 istih uzoraka koji će omogućiti ispitivanje što više mogućih toplinski stanja nakon toplinske obrade i usporedbu istih. Zbog kemijskog sastava, tj. visokog udjela ugljika odabran je sljedeći plan provedbe pokusa po uzorcima kako bi se odredila optimalna toplinska obrada:

1. uzorak → oznaka uzorka 0; osnovno stanje; bez ikakve toplinske obrade
2. uzorak → oznaka uzorka 1; kaljenje bez popuštanja
3. uzorak → oznaka uzorka 2; kaljenje + nisko – temperaturno popuštanje
4. uzorak → oznaka uzorka 3; kaljenje + (2x) visoko – temperaturno popuštanje
5. uzorak → oznaka uzorka 4; kaljenje + (3x) visoko – temperaturno popuštanje
6. uzorak → oznaka uzorka 5; kaljenje + duboko hlađenje (1 sat) + nisko – temperaturno popuštanje
7. uzorak → oznaka uzorka 6; kaljenje + duboko hlađenje (4 sata) + nisko – temperaturno popuštanje
8. uzorak → oznaka uzorka 7; kaljenje + duboko hlađenje (24 sata) + nisko – temperaturno popuštanje.

5.2. Priprema uzoraka

Kako bi se postigle ravne plohe sirovog komada čelika, isti je podvrgnut postupku glodanja (Slika 28). Glodanje je odrađeno u tvrtki Auspuh Lastovčić d.o.o. Na taj način uzorci su dovedeni u željene dimenzije te samim time povećana je preciznost ispitivanja i rezultata nakon provedenih toplinskih obrada.



Slika 28. Obrada odvajanjem čestica – glodanje

Zatim se glodani komad rezo na tračnoj pili svakih 18 mm kako bi se dobilo 8 identičnih uzoraka dimenzija 18 x 18 x 9,5 mm.

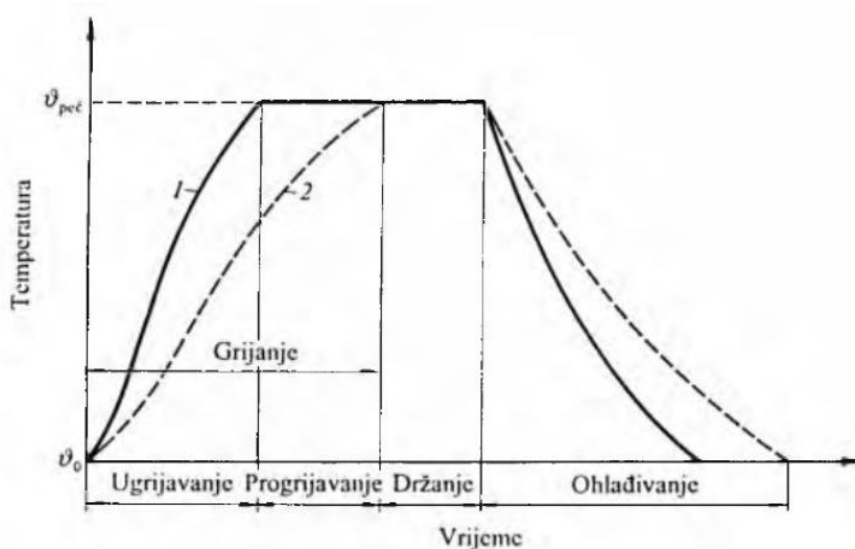


Slika 29. Rezanje na željene dimenzije na tračnoj pili

5.3. Odabir parametara toplinske obrade čelika X155CrVMo12 – 1

Slika 30 prikazuje opći dijagram toplinske obrade. Kako bi dobili što bolja svojstva nakon kaljenja i tako ih usporediti s osnovnim stanjem prije toplinske obrade potrebno je odrediti parametre toplinske obrade:

- temperaturu austenitizacije
- vrijeme i režim ugrijavanja
- držanje na temperaturi austenitizacije
- potrebno sredstvo za hlađenje (gašenje) čelika
- temperaturu popuštanja (za nisko – temperaturno i visoko – temperaturno popuštanje)
- te navesti očekivanu tvrdoću nakon
 - kaljenja
 - kaljenja + popuštanja
 - kaljenja + dubokog hlađenja + popuštanja.

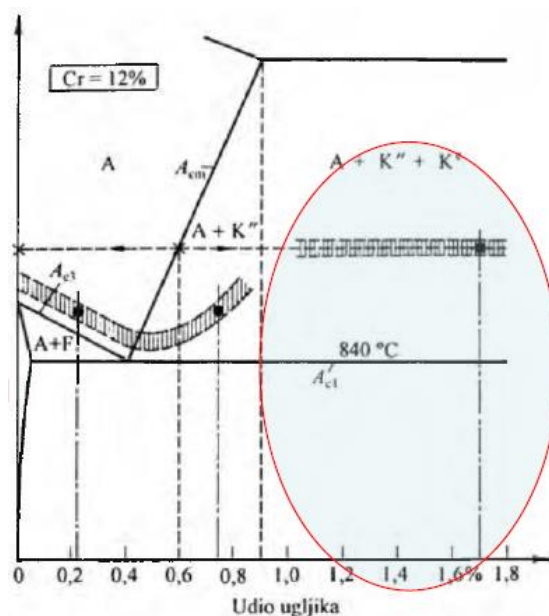


Slika 30. Dijagram toplinske obrade (opći); 1 – oznaka ruba obratka, 2 – oznaka jezgre obratka, ϑ_0 – početna (sobna) temperatura, $\vartheta_{peć}$ – temperatura (peći) austenitizacije, t_{gr} – vrijeme grijanja (ugrijavanje + progrijavanje), t_{id} – vrijeme držanja, t_u – ukupno vrijeme ugrijavanja [24]

5.3.1. Temperatura austenitizacije (ϑ_a)

Austenitizacija je prva faza postupka kaljenja; ona predstavlja postupak ugrijavanja i držanja čelika na određenoj temperaturi (iznad A_1 temperature za nadeutektoidne čelike, $\vartheta_a = A_1 + (50 \dots 70 \text{ }^\circ\text{C})$) kako bi im se promijenila mikrostruktura; tj. kako bi se pretvorila u austenit (djelomično ili potpuno). Ugrijavanje se vrši u vakuumskoj peći.

Iz ovoga se da zaključiti da je optimalna temperatura austenitizacije između $1020 \text{ }^\circ\text{C}$ do $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ [23].



Slika 31. Visoko – ugljični ledeburitni alatni čelik [24]

Zbog visokog udjela ugljika te kako bi se istakla tvrdoća nakon dubokog hlađenja (sekundarno otvrdnuće) odabrana je viša temperatura austenitizacije; $1070 \text{ }^\circ\text{C}$.

5.3.2. Određivanje vremena grijanja (t_{gr}) i režima ugrijavanja

Kako legirni elementi imaju velik utjecaj na mikrostrukturu čelika; promiču austenitnu i feritnu mikrostrukturu, potrebno je odrediti potreban broj pregrijavanja samog čelika prije nego što dođe do temperature austenitizacije. Ako Za konstrukcijske čelike broj i temperatura predgrijavanja određuje se prema sljedećoj formuli:

$$C_{ekv} = C + \frac{Mn}{5} + \frac{Cr}{4} + \frac{Mo}{3} + \frac{Ni}{10} + \frac{V}{5} + \frac{Si-0,5}{5} + \frac{Ti}{5} + \frac{W}{10} + \frac{Al}{10} \quad 5.1$$

Za alatne čelike predgrijavanje se obavezuje prema sljedećim pravilima:

- I. predgrijavanje → na temperaturu od 400 – 500 °C za sve vrste alatnih čelika
- II. predgrijavanje → na temperaturu od 860 – 880 °C za visoko legirane alatne čelike sa temperaturom austenitizacije od 960 – 1150 °C; **I. + II. predgrijavanje**)
- III. predgrijavanje → na temperaturu 1050 °C; brzorezni čelici (vrše se sva tri predgrijavanja) [25].

Omjer trajanja I. i II. pregrijavanja visoko – legiranog alatnog čelika određuje se prema pravilu:

- $t_{I. pred} : t_{uk} \approx 3 : 1$
- $t_{II. pred} : t_{uk} \approx 2 : 1$
- $t_{III. pred} : t_{uk} \approx 3 : 1$ [25].

Slika 30 prikazuje opći dijagram. Iz nje se može vidjeti struktura vremena austenitizacije. Primjenom različitih analitičkih metoda (npr. prema Smoljnikovu, Newtonu ili Ordinanzu) ili numeričkih metoda (npr. metoda konačnih diferencija, konačnih elemenata ili kontrolnih volumena) moguće je odrediti ukupno vrijeme trajanja grijanja (t_{gr}). Na vrijeme grijanja utječu sljedeći čimbenici:

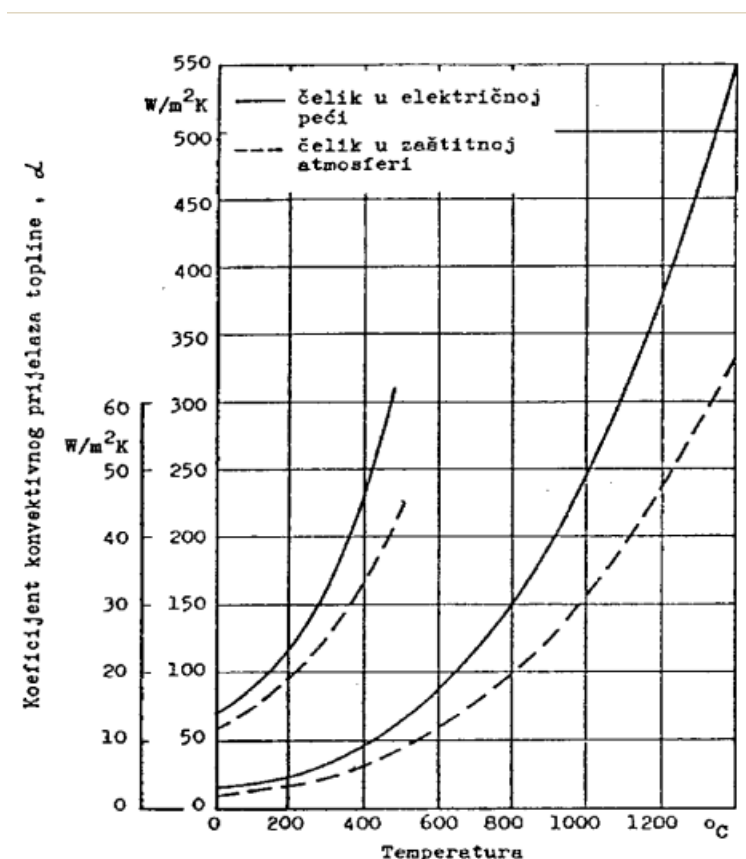
- zavisni od obratka → njegova masa, dimenzije, površina, oblik (V/A – omjer volumena i površine obratka), toplinska vodljivost
- zavisni od tehnoloških parametara procesa → broj i raspored obradaka, temperatura austenitizacije (ugrijavanja), režim grijanja
- zavisni od postrojenja → vrsta grijanja (peć, kupka ili slično), način ugrijavanja, medij i dr [25].

Za određivanje vremena grijanja (t_{gr}) koristit će se **Newtonova metoda** – u slučaju visoke toplinske vodljivosti materijala moguće je zanemariti temperaturu raspodjele po volumenu ugrijanog obratka, ako se zadovolji sljedeći uvjet:

$$B_i = \frac{\alpha \left(\frac{V}{A}\right)}{\lambda} \leq 0,25 \quad 5.2$$

gdje je:

- Bi – biotov broj; 1
- α – koeficijent prijelaza topline, $[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$
- λ – koeficijent toplinske vodljivosti, $[\text{W}/\text{mK}]$
- V/A – omjer volumena i površine obratka, $[\text{m}]$ [25].



Slika 32. Koeficijent prijelaza topline, α

Za masivnije predmete kod koji je $Bi > 0,25$ uvodi se ε ; koeficijent usporenja ugrijavanja koji ovisi o obliku predmeta:

$$\text{za ploču; } \varepsilon = \frac{1}{1+Bi\frac{1}{3}} \quad 5.3$$

$$\text{za valjak; } \varepsilon = \frac{1}{1+Bi\frac{1}{3,5}} \quad 5.4$$

$$\text{za kuglu; } \varepsilon = \frac{1}{1+Bi\frac{1}{5}} \quad 5.5$$

Tablica 14 prikazuje formulu za određivanje omjera volumena i površine ovisno o obliku tijela koji se treba ugrijavati.

Tablica 14. Formula za određivanje omjera; V/A [25]

Tijelo	Uzeto za minimalnu dimenziju	Druge dimenzije	Formula za određivanje V/A [cm]
Kugla	Promjer (D)	-	$\frac{D}{6}$
Kocka	Osnovica (D)		$\frac{D}{6}$
Puni cilindar	Promjer (D)	Visina (H)	$\frac{D * H}{4H + 2D}$
Razna prizma s osnovicom u obliku bilo kojeg mnogokuta	Upisani promjer kruga (D)	Visina (H)	$\frac{D * H}{4H + 2D}$
Šuplji cilindar	Vanjski promjer (D)	Unutarnji promjer (d)	$\frac{(D - d) * H}{4H + 2(D - d)}$
Ploča	Debljina	$C \leq B \leq A$	$\frac{A * B * C}{2 * (A * B + A * C + B * C)}$

Pošto su u ovom slučaju poznate stranice uzoraka, može se odrediti točna vrijednost omjera volumena i površine:

$$\frac{V}{A} = \frac{0,018 * 0,018 * 0,0095}{(0,018 * 0,018) * 2 + (0,018 * 0,0095) * 4} = 2,31 * 10^{-3} \text{ m}$$

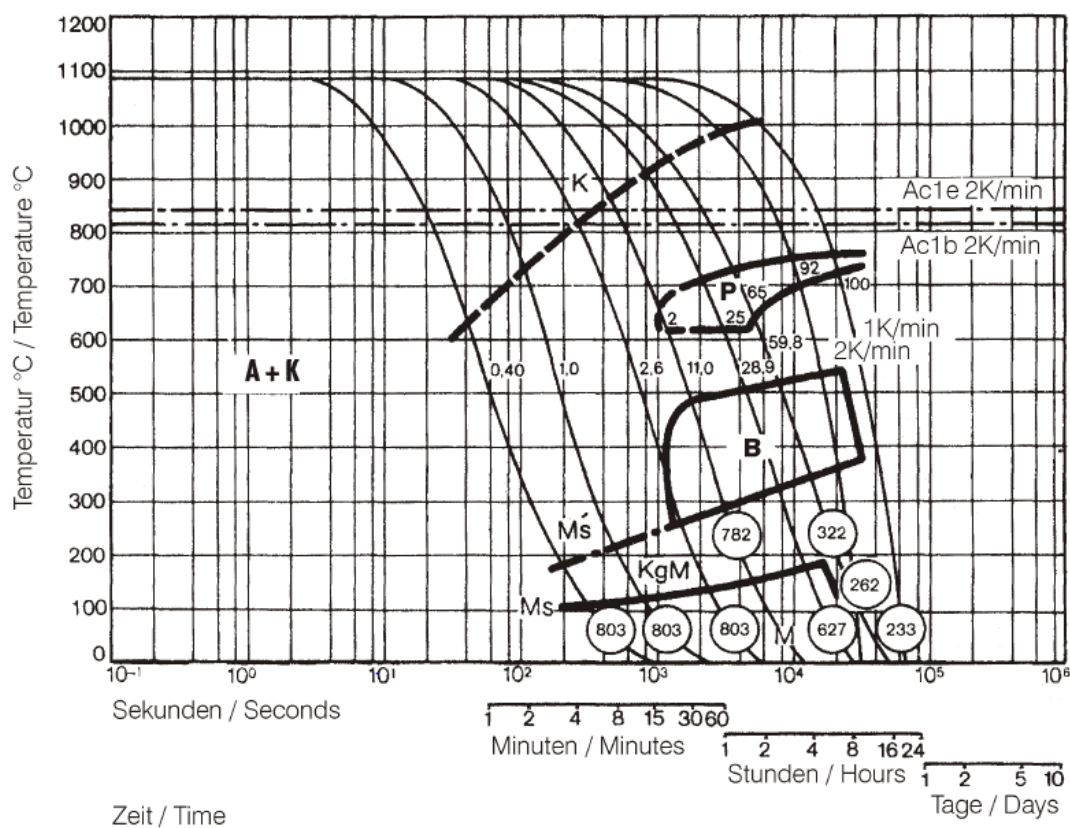
$$t_{gr} = \frac{\left(\frac{V}{A}\right) * c * \varphi}{\alpha * \varepsilon} * \ln\left(\frac{\vartheta_{peć} - \vartheta_{poč}}{\vartheta_{peć} - \vartheta_{zavr}}\right), \text{ s} \quad 5.6$$

gdje je:

⇒ t_{gr} – vrijeme grijanja, s

⇒ $\left(\frac{V}{A}\right)$ – omjer volumena i površine obratka, m

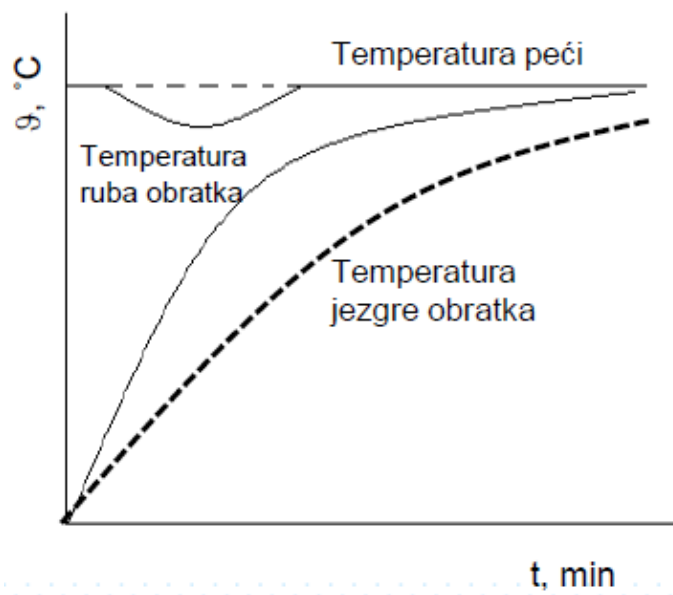
- ⇒ c – specifični toplinski kapacitet
- ⇒ φ – gustoća kg/m^3
- ⇒ α – koeficijent prijelaza topline, $\text{W/m}^2\text{K}$
- ⇒ ε – koeficijent usporenja ugrijavanja
- ⇒ $\vartheta_{peć}$ – temperatura peći, $^{\circ}\text{C}$
- ⇒ $\vartheta_{poč}$ – početna temperatura (predmeta), $^{\circ}\text{C}$
- ⇒ ϑ_{zavr} – završna temperatura (predmeta), $^{\circ}\text{C}$ [25].



Slika 33. TTT dijagram – K110DE [26]

Izjednačenje temperatura završne temperature obratka i peći ($\vartheta_{peć}$ i ϑ_{zavr}) u praksi nije moguće, pa se stoga dopuštaju slijedeće vrijednosti:

- $\vartheta_{peć} - \vartheta_{zavr} = 2 \text{ do } 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (za $Bi < 0,5$)
- $\vartheta_{peć} - \vartheta_{zavr} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (za $Bi > 0,5$) [24].



Slika 34. Dijagram ugrijavanja jezgre i površine obratka [24]

Slika 33 prikazuje TTT dijagram iz kojeg se može vidjeti vrijeme gašenja koje iznosi 15 minuta; vrijeme s kojim se postiže maksimalna tvrdoća [26].

5.3.3. Vrijeme držanja na temperaturi austenitizacije (t_{id})

Vrijeme držanja (t_{id}) na temperaturi austenitizacije određuje se u ovisnosti o vrsti čelika ili prema preporukama proizvođača, a započinje tek nakon što se temperatura jezgre i temperatura površine izjednače, tj. nakon završetka t_{gr} . Prema literaturi, za visoko – legirani alatni čelik iz ovog rada, izdvaja se temperatura austenitizacije 1040 °C te držanje na istoj od 15 do 30 minuta [26]. Tablica 15 prikazuje preporuku odredbe vremena držanja čelika na temperaturi austenitizacije pri sporom ugrijavanju istog [25].

Tablica 15. Literaturni izvadak preporuke za određivanje t_{id} pri sporom ugrijavanju [25]

Grupa čelika	Vrijeme držanja na temperaturi austenitizacije, t_{id} [min]
Konstrukcijski čelici	nelegirani čelici za poboljšanje; 10 do 15 min
	nisko-legirani čelici za poboljšanje; 15 do 20 min
Alatni ugljični čelici	$t_{id} = 10 \text{ do } 15$
Alatni nisko – legirani čelici	$t_{id} = 1 + 0,6Cr + 0,4W + 3V - 0,04(\vartheta_{stv} - \vartheta_{rač})$
Alatni visoko – legirani čelici (s 5 % do 14 % Cr)	$t_{id} = 0,2Cr + 0,5W + V + Mo - 0,03(\vartheta_{stv} - \vartheta_{rač})$
Alatni brzorezni čelici	$t_{id} = 0,08W + 0,2V + 0,15Mo - 0,024(\vartheta_{stv} - \vartheta_{rač})$

U ovom radu temperatura austenitizacije odvija se 1070 °C te se zadržava na istoj 20 minuta.

5.3.4. Gašenje i sredstva za gašenje

Ovisno o kvaliteti čelika potrebno je odabrati sredstvo za gašenje s kojim će se dobiti 100 % martenzitna struktura. Uvijek se nastoji odabrati „najblaže“ sredstvo za gašenje kako bi se uklonila mogućnost od nastanka pukotina te isto tako smanjila opasnost od nastanka naprezanja, a da se dobije najveći mogući udio martenzita (da se osigura transformacija austenita u martenzit, a izbjegne perlit). Kako bi se odabralo optimalno sredstvo za gašenje uglavnom se kreće od analize kontinuiranog TTT dijagrama i iz njega se određuje kritična brzina ohlađivanja. U ovom slučaju potrebno je odrediti gornju kritičnu brzinu gašenja (v_{kg}); najmanju brzinu gašenja kod koje se dobiva 100 % martenzitna mikrostruktura, prema formuli:

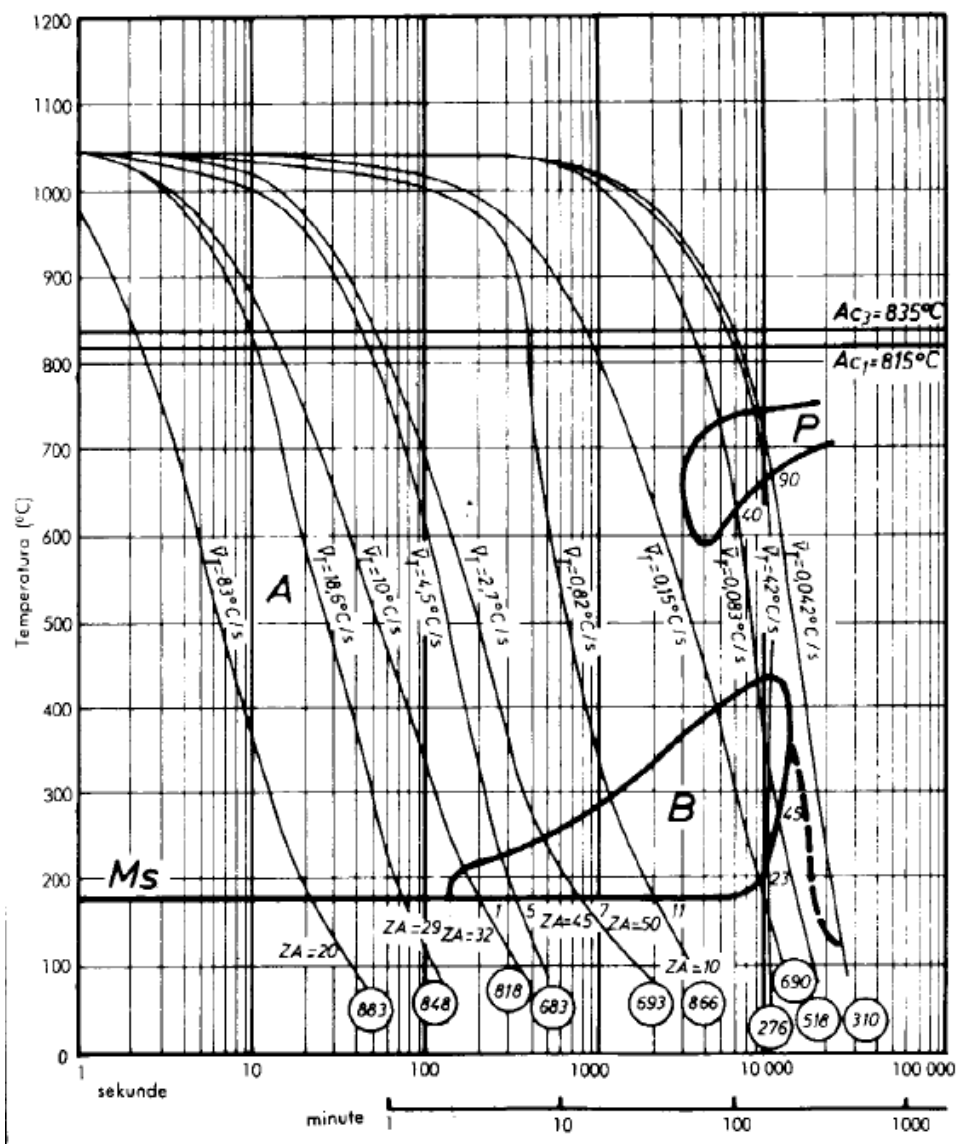
$$v_{kg} = \frac{\vartheta_A - \vartheta_i}{t_{i_{min}}}; [^{\circ}\text{C}/\text{min}] \quad 5.7$$

gdje je:

- $t_{i_{min}}$ – minimalno vrijeme inkubacije, [min]
- ϑ_i – temperatura inkubacije, [$^{\circ}\text{C}$]
- ϑ_A – temperatura austenitizacije, [$^{\circ}\text{C}$]
- v_{kg} - gornja kritična brzina gašenja [$^{\circ}\frac{\text{C}}{\text{min}}$] [25].

Prema literaturi, gašenje se mora odvijati vrlo sporo od 1050 $^{\circ}\text{C}$ do 850 $^{\circ}\text{C}$ u peći, a zatim hlađenje nastaviti na zraku [26].

Slika 35 prikazuje kontinuirani TTT dijagram za X155CrVMo12 – 1 čelik. Iz TTT dijagrama može se uočiti kritično temperaturno područje; područje oko temperature inkubacije (ϑ_i) kod koje je potrebno brzo hlađenje kako bi se izbjegla moguća pretvorba pothlađenog austenita (Ap) u perlit (P) ili bainiti (B) [23].



Slika 35. Kontinuirani TTT dijagram za visoko – legirani alatni čelik; X155CrVMo12 – 1 [23]
Razlikujemo tri vrste sredstava za gašenje (sredstva rangirana od najbržih prema najsporijim):

- sredstva za gašenje s vrelištem nižim od temperature austenitizacije obratka (podložna Leidenfrostovom fenomenu)
 - voda
 - ulje za kaljenje (organsko, sintetsko)
 - vodene otopine organskih ili anorganskih tvari (vodene otopine polimera)
 - emulzije (mješavina vode i ulja)

- sredstva za gašenje s vrelištem višim od temperature austenitizacije obratka (nisu podložna Leidenfrostovom fenomenu)
 - solne kupke
 - rastaljeni metali
- vakuum i tehnički plinovi (nisu podložna Leidenfrostovom fenomenu)
 - komprimirani; mirni zrak
 - fluidizirane kupke (čestice)
 - inertni plinovi: N₂, H₂, Ar [25].

Leidenfrostov fenomen → kod ovog fenomena pri gašenju obratka javljaju se tri faze; faza parnog omotača (oko obratka se pojavljuje parni omotač koji blokira odvođenje topline), faza vrenja (raskida se parni omotač i postiže se maksimalno odvođenje topline) i faza hlađenja konvekcijom (jako sporo hlađenje, nastaje na samom kraju gašenja, dolazi do izjednačavanja temperatura vrelišta sredstva i obratka) [24].

U ovom radu gašenje se odvijalo u vakuumskoj peći. Čelik se gasio s cirkulacijom dušika unutar peći, što je ujedno i najveća moguća brzina gašenja za tu peć.

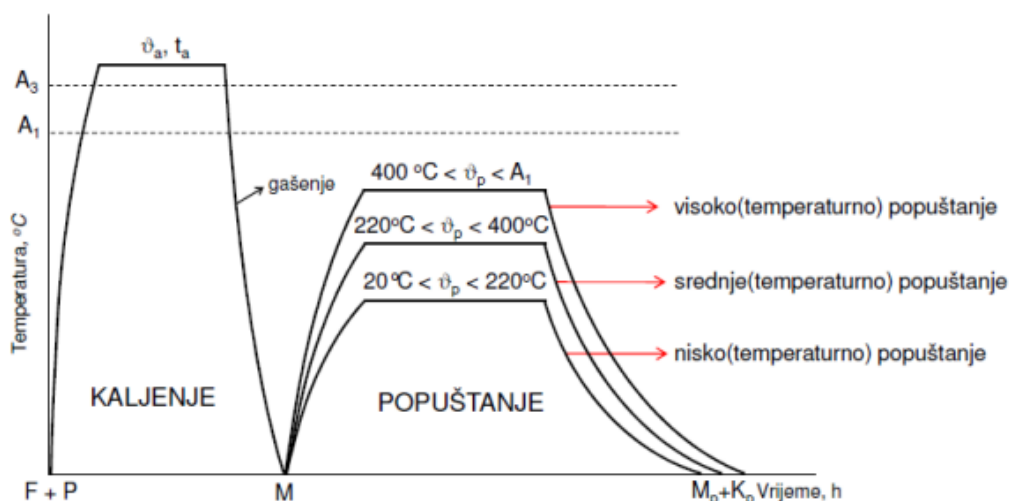
Da bi se postigla tvrdoća kakva je prikazana u TTT dijagramu, mora se gasiti srednjom brzinom od 18.6 – 83 °C/s (kako je očitana brzina u dijagramu na slici 36 za taj čelik).

5.3.5. Temperature popuštanja

Popuštanje je postupak koji se provodi nakon kaljenja čelika na način da se čelik ponovo zagrije na temperaturu ispod A_1 temperature u svrhu:

- redukcije zaostali naprezanja („napetosti“ martenzita)
- povišenja žilavosti zbog toga što su čelici nakon kaljenja jako tvrdi, a krhki
- postizanja dimenzijske stabilnosti (u slučaju alatnog čelika – pretvorba zaostalog austenita (A_z) u martenzit i karbid) [25].

Također, popuštanje snižava tvrdoću čelika iako to nije cilj, ali je nužna posljedica ovog postupka. Na uzorku 3 proveden je postupak nisko – temperaturnog popuštanja, a na uzorcima 4 i 5 višestruko visoko – temperaturno popuštanje. Slika 36 prikazuje dijagram s vrste popuštanja.



Slika 36. Shematski prikaz postupka popuštanja [24]

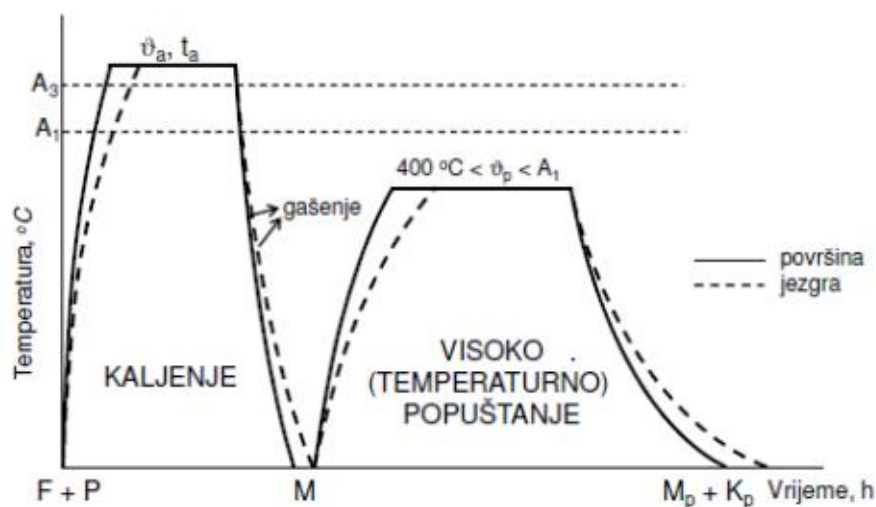
Nisko – temperaturno popuštanje ($\vartheta_p < 220$ °C)

Ova vrsta popuštanja provodi se na temperaturi do 220 °C ($\vartheta_p < 220$ °C). Uzorci koji su podvrgnuti nisko – temperaturnom popuštanju su uzorci nakon kaljenja (uzorak broj 2) te uzorci nakon dubokog hlađenja (uzorak broj 5, 6 i 7). Navedeni uzorci popuštali su se na 180 °C te držalo na istoj 2 sata.

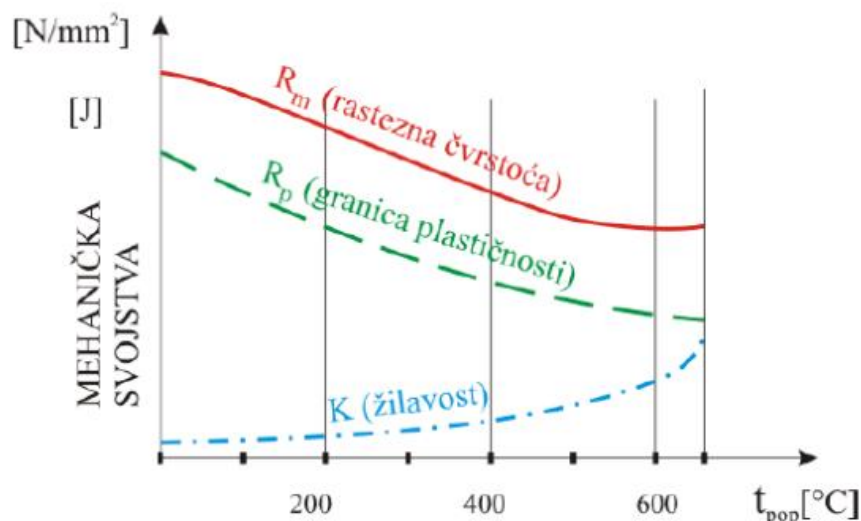
Visoko – temperaturno popuštanje ($400\text{ °C} < \vartheta_p < A_1$)

Ova vrsta popuštanja provodi se na temperaturi od 400 °C do A_1 temperature ($400\text{ °C} < \vartheta_p < A_1$) te još se naziva i poboljšanje čelika (postupak koji se sastoji od kaljenja + visoko – temperaturnog popuštanja).

U ovom radu visoko – temperaturno popuštanje odvijalo se na 525 °C te se držalo na istoj 2 sata.



Slika 37. Dijagram poboljšanja čelika [24]



Slika 38. Dijagram mehaničkih svojstava u ovisnosti o temperaturi popuštanja [24]

5.3.6. Očekivana tvrdoća

Prema literaturi izdvajaju se sljedeće očekivane tvrdoće po određenim postupcima:

- ❖ nakon kaljenja → s temperature austenitizacije i hlađenja na zraku, očekivana tvrdoća čelika iznositi između 62 – 65 HRC
- ❖ kaljenje + popuštanje → za razne temperature popuštanja izdvajaju se različite očekivane tvrdoće prema sljedećoj tablici:

Tablica 16. Očekivane tvrdoće nakon popuštanja zakaljenog čelika (X155CrVMo12 – 1) [26]

Temperatura popuštanja [°C]	150	200	250	300	350	400
Tvrdoća [HRC]	61-62	60-61	59-60	56-57	55-56	55-56

- ❖ kaljenje + duboko hlađenje + popuštanje → od 56 do 60 HRC [26].

5.4. Vakuumska peć

Slika 39 prikazuje vakuumsku peć u kojoj je provedena toplinska obrada alatnog čelika te ista se nalazi u Laboratoriju za toplinsku obradu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.



Slika 39. Ipsen – vakuumska peć

5.4.1. Tehnički podaci

U nastavku slijede tehnički podaci vakuumske peći VFC25:

- proizvođač: Ipsen GmbH, Njemačka
- maksimalni vakuum: 10^{-6} bar
- maksimalna radna temperatura: 1300 °C
- maksimalne korisne dimenzije peći:
 - širina: 200 mm
 - visina: 150 mm
 - dužina: 300 mm.

5.5. Rezultati ispitivanja tvrdoće

Sljedeća tablica prikazuje kratak opis i numeričke oznake svakog uzorka te temperature popuštanja i vrijeme držanja na istim.

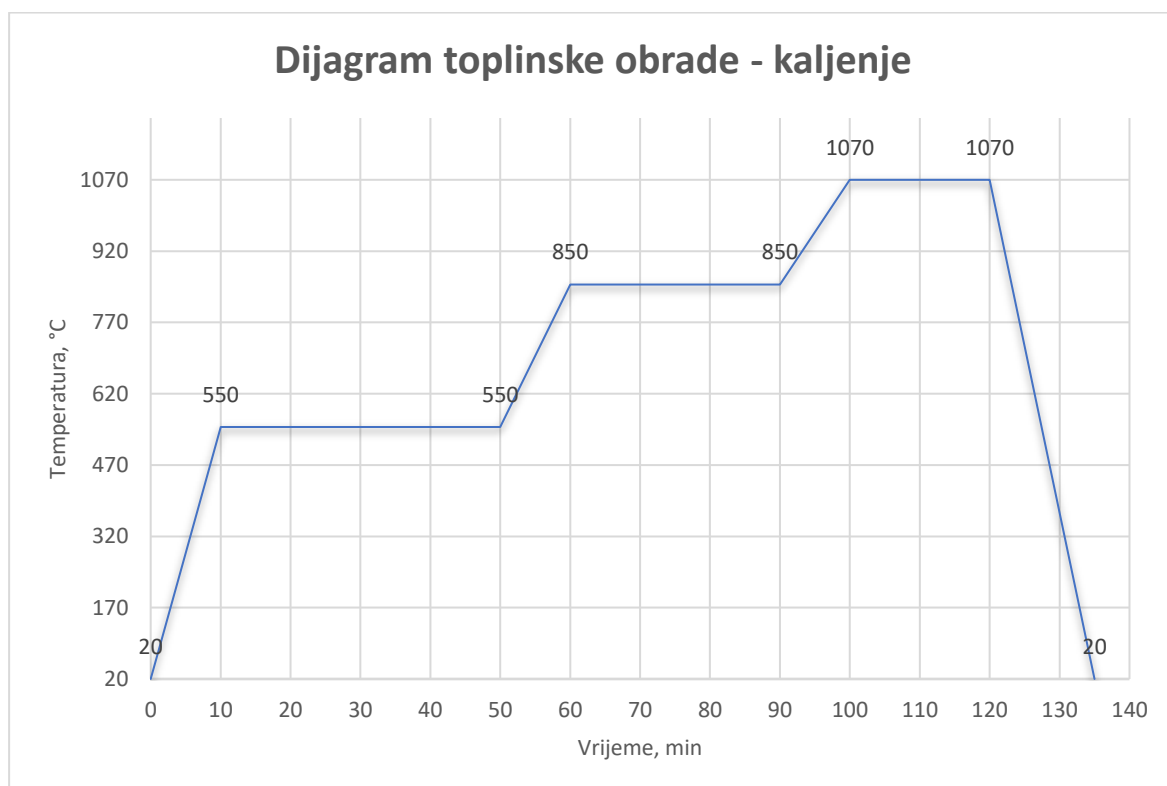
Tablica 17. Oznake ispitnih uzoraka

Uzorak br.	Opis provedenog postupka	Temperatura popuštanja [°C]	Držanje u tekućem dušiku [sati]	Držanje na temperaturi popuštanja [sati]
0	Osnovno stanje	-	-	-
1	Kaljeno stanje	-	-	-
2	Kaljenje + nisko-temperaturno popuštanje	180	-	2
3	Kaljenje + visoko-temperaturno popuštanje (2x)	525	-	2
4	Kaljenje + visoko-temperaturno popuštanje (3x)	525	-	2
5	Kaljenje + DH + nisko-temperaturno popuštanje	180	1	2
6	Kaljenje + DH + nisko-temperaturno popuštanje	180	4	2
7	Kaljenje + DH + nisko-temperaturno popuštanje	180	24	2

Svi ispitni uzorci kaljeni su istovremeno. Slika 40 prikazuje uzorke u peći, a postupak kaljenja prikazan je dijagramom (Slika 41).



Slika 40. Uzorci u vakuumskoj peći



Slika 41. Dijagram kaljenja ispitnih uzoraka

Iz dijagrama se vidi da je toplinska obrada u vakuumskoj peći započeta sa sobne temperature (20 °C). Svako zagrijavanje uzoraka na višu temperaturu trajalo je 10 minuta; vrijeme zagrijavanja s početne (sobne) temperature do 550 °C je trajalo 10 minuta te isto tako vrijedi za drugo predgrijavanje odnosno treće zagrijavanje na temperaturu austenitizacije. Ukupno vrijeme grijanja (t_{gr}) trajalo je 100 minuta, a držanje na temperaturi austenitizacije (t_{id}) 20 minuta, iz čega slijedi da je ukupno vrijeme u grijavanja trajalo 120 minuta. Gašenje se odvijalo u vakuumskoj peći maksimalnom mogućom brzinom koju peć može ostvariti uz cirkulaciju dušika. Srednja brzina gašenja do 250 °C iznosila je približno 1 °C/s te nakon te temperature brzina gašenja bila je znatno manja. Ukupno vrijeme ohlađivanja trajalo je 15 – stak minuta.

Nakon postupka kaljenja uzorci s numeričkim oznakama 5, 6 i 7 postavljeni su u spremnik s tekućim dušikom na 1, 4 i 24 sata (Slika 42), dok su uzorci 3 i 4 postavljeni u drugu peć na višestruko visoko-temperaturno popuštanje (na 525 °C na 2 sata;). Nakon svakog ciklusa uzorci su prije vraćanja na ponavljanje postupka popuštanja ohlađeni do sobne temperature. Uzorak broj 2 nakon kaljenja je podvrgnut nisko-temperaturnom popuštanju (180 °C) i držan na istoj 2 sata.



Slika 42. Uranjanje uzoraka u tekući dušik te izgled uzorka nakon dubokog hlađenja



Slika 43. Peć za popuštanje čelika (525 °C; 180 °C)

Nakon svih provedenih postupaka toplinskih obrada, na uzorcima je ispitana tvrdoća metodom Rockwell. Slika 44 prikazuje uređaj za mjerenje tvrdoće prema Rockwell metodi.



Slika 44. Tvrdomjer prema Rockwell metodi

Slika 45 prikazuje uzorke nakon provedenih toplinskih obrada i ispitivanja tvrdoće, a u nastavku slijedi tablica s rezultatima izmjerenih tvrdoća svakog pojedinačnog uzorka.

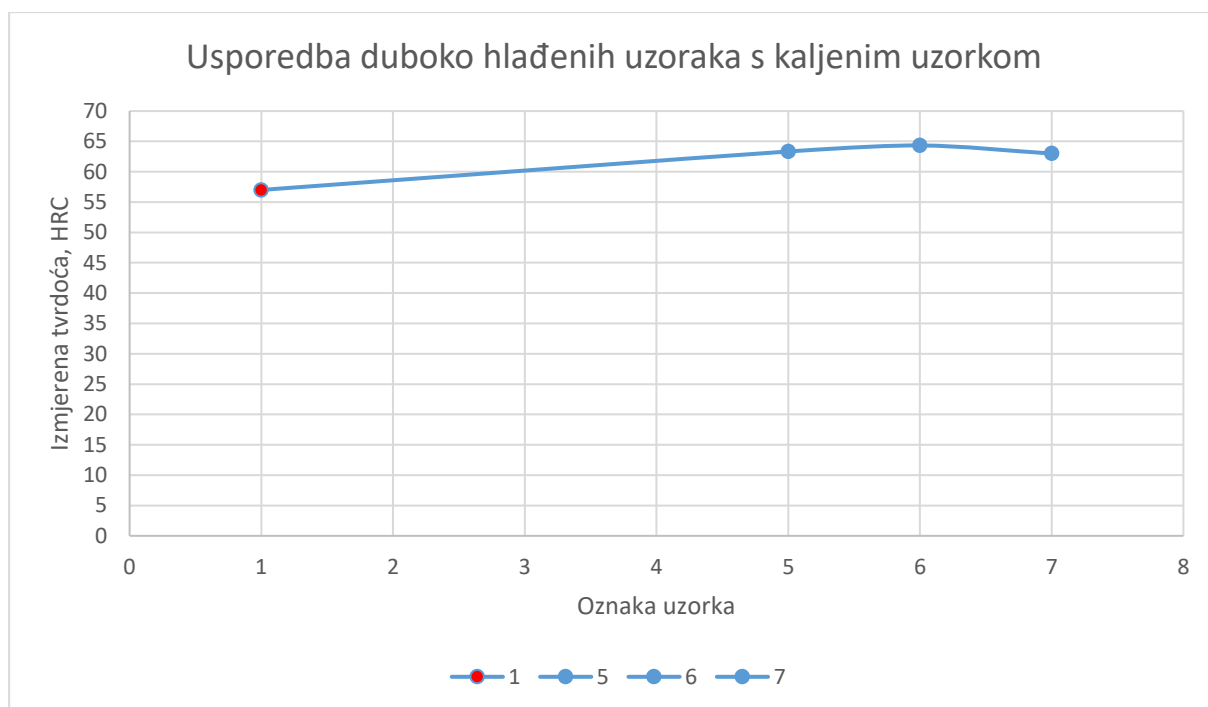


Slika 45. Uzorci nakon provedenih ispitivanja

Tablica 18. Rezultati ispitivanja tvrdoće čelika

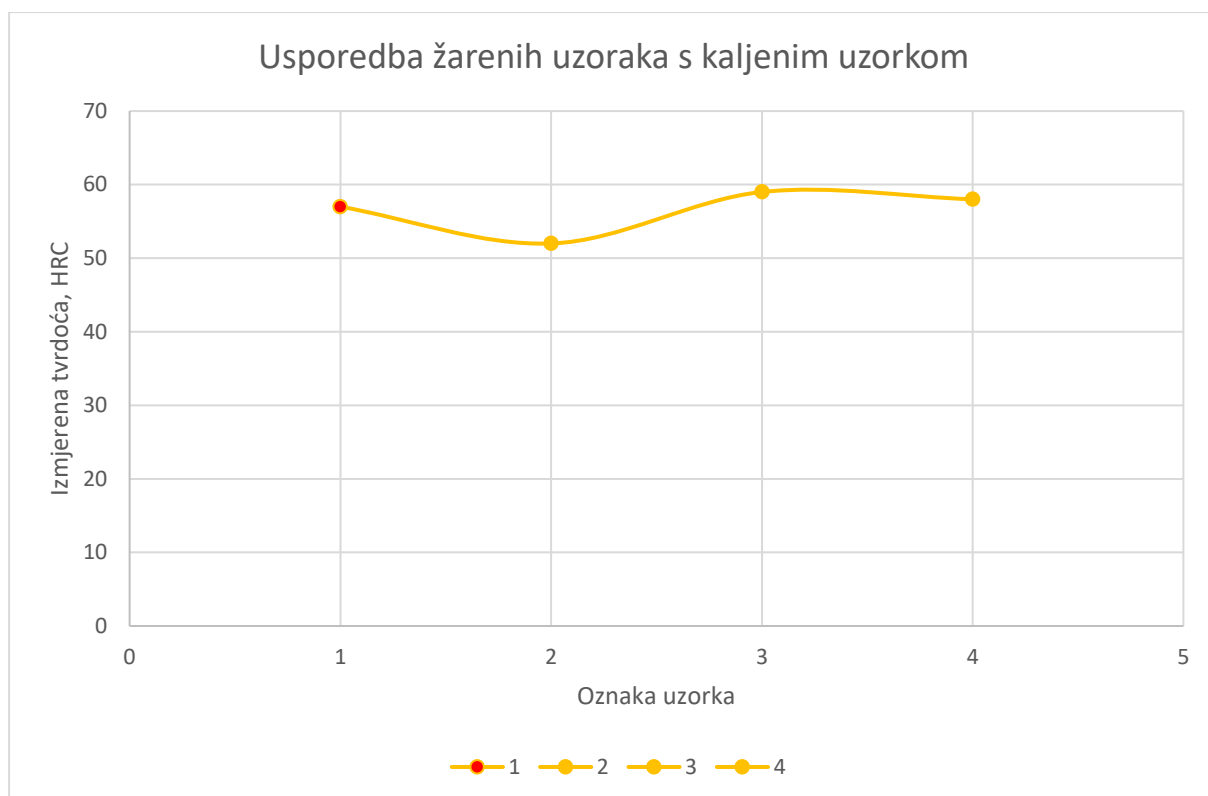
Uzorak br.	Opis provedenog postupka	Tvrdoća [HRC]			Srednja vrijednost
		1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	
0	Osnovno stanje	20	18	17	18
1	Kaljeno stanje	57	58	56	57
2	Kaljenje + NP	52	53	52	52
3	Kaljenje + 2x VP	59	60	58	59
4	Kaljenje + 3x VP	59	57	58	58
5	Kaljenje + DH (1 sat) + NP	62	64	64	63
6	Kaljenje + DH (4 sat) + NP	66	64	63	64
7	Kaljenje + DH (24 sat) + NP	62	63	64	63

Iz dobivenih rezultata mogu se načiniti sljedeći dijagrami u nizu (Slika 46 i Slika 47).



Slika 46. Usporedba duboko hlađenih uzoraka s kaljenim uzorkom

Iz ovog dijagrama može se zaključiti da najintenzivnije sekundarno otvrdnuće nakon dubokog hlađenja nastupa već nakon 4 sata držanja u tekućem dušiku te srednja vrijednost nakon sekundarnog otvrdnuća iznosi 63 HRC. Uzorak broj 1 prikazuje kaljeno stanje, a uzorak 5, 6 i 7 uzorke podvrgnuti dubokom hlađenju. Prilikom dubokog hlađenja postignuta je značajno viša tvrdoća što pokazuje da kod ovog čelika ostaje jako puno zaostalog austenita koji se tijekom dubokog hlađenja transformira u martenzit.



Slika 47. Usporedba popuštenih uzoraka s kaljenim uzorkom

Slika 47 prikazuje dijagram uzoraka kaljenog stanja i popuštenih uzoraka. Uzorak 2 je nisko-temperaturno popušten na temperaturi od 180 °C te prikazuje znatno manju tvrdoću u odnosu na visoko-temperaturno popuštene uzorke. Kod nisko-temperaturnog popuštanja dolazi do sređivanja rešetke martenzita (smanjenjem stupnja tetragonalnosti) te također dolazi do pada tvrdoće.

5.6. Ugradnja alata u ekscentarsku prešu

Izrađeni alat montiran je na rotacijski stol i isproban u eksploatacijskim uvjetima (Slika 49). Alat je isproban u tvrtki Auspuh Lastovčić u Samoboru.



Slika 48. Rotacijski stol s alatima za probijanje i provlačenje



Slika 49. Izgled lima nakon probijanja izrađenim alatom

6. ZAKLJUČAK

Nakon provedenih ispitivanja može se zaključiti: visoka temperatura austenitizacije (1070 °C) odabrana je kako bi se na uzorcima (uzorci broj 5, 6 i 7) prikazao efekt sekundarnog otvrdnuća nakon kaljenja; što se i uspjelo vidjeti u prethodnom poglavlju ispitivanja. Prilikom kaljenja ovog čelika postignuta je vrijednost od 57 HRC, što je niže nego što se za taj čelik navodi u katalogu proizvođača. Vrijednosti tvrdoće postignute višestrukim popuštanjem, a posebno naknadnim dubokim hlađenjem pokazuju da kod ovog čelika veliki udio mase čelika ostaje ne transformirani zaostali austenit koji se višestrukim popuštanjem ili dubokim hlađenjem transformirao u sekundarni martenzit. Također se može primijetiti da su vrijednosti tvrdoće nakon dubokog hlađenja veće od vrijednosti tvrdoće postignute nakon višestrukih popuštanja što potvrđuje tezu da je jedino duboko hlađenje postupak kojim se osigurava transformacija zaostalog austenita u martenzit.

Rezultat tvrdoće nakon nisko-temperaturnog popuštanja od 52 HRC pokazuje da je prilikom popuštanja došlo do smanjenja stupnja tetragonalnosti martenzita što je rezultiralo padom tvrdoće u odnosu na kaljeno stanje, ali ne i na transformaciju zaostalog austenita (on je ostao prisutan, a tvrdoća se smanjila).

U pogonskim uvjetima ispitivanja za sada su rezultati iznad naših dosadašnjih iskustava u radu s ovom kvalitetom čelika, tj. X155CrVMo12-1.

LITERATURA

- [1] Ciglar D. PikAin, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje. 2019. .
- [2] Brajčinović S. BHA, Medved J. . Alatni čelici - podjela i osnovna svojstva. 2018.
- [3] Golubić S., Tehnički materijali, I. dio metalni materijali, Bjelovar, 2019.
- [4] Sunulahpašić R., Oruč M. , Alatni čelici i ostali alatni materijali - svojstva i primjena, 2019.
- [5] Novosel M C, F., Krumes, D., Alatni materijali, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 1996 g.
- [6] Ćorić D RV, Landek D. Predavanja iz kolegija Posebni metalni materijali. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje. 2018.
- [7] Filetin T., Kovačidek F., Indof J., Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [8] Krumes, D., Toplinska obradba, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2000.
- [9] B. Dobranić, Trošenje dijelova građevinskih strojeva, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012. .
- [10] Landek D., Predavanja iz kolegija Alatni materijali, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2018.
- [11] JR. De Hoff, Thermodynamics in Material Science, Taylor and Francis Group, New York, USA, 2006. .
- [12] Spajić Ž., Izbor materijala za izradu alata za provlačenje rotora generatora, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2011.
- [13] Kožuh S., Specijalni čelici - skripta, Metalurški fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Sisak, 2010.
- [14] Gabrić I., Šitić S., Materijali II, Sveučilišni odjel za stručne studije, Sveučilište u Splitu, Split, 2015.
- [15] Kladarić I., Toplinska obrada alatnih čelika, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Sveučilište u Slavonskom Brodu, 2017.
- [16] Polović F., Usporedba svojstava tvrdih prevlaka na alatnom čeliku za topli rad EN X37CrMoV5-1, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2018.

- [17] Stupnišek M., Cajner F., Osnove toplinske obrade metala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2001.
- [18] Slaćanin I., Doprinos dubokog hlađenja poboljšane svojstava visokolegiranih alatnih čelika za hladni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2016.
- [19] Liščić B., Tensi Hans M., Canale L. C. F., Totten George E.; Quenching Theory and Technology - Second Edition, 2010. .
- [20] George E. Totten, Ph. D. FASM; Steel heat treatment - Equipment and process design, 2007. .
- [21] Andersson R. HT, Wiberg S. , Linde Gas Special Edition - Furnace Atmospheres No. 2, Neutral Hardening and Annealing, 2005. .
- [22] Ekscentar preša – Wikipedija, https://hr.wikipedia.org/wiki/Ekscentar_pre%C5%A1a#/media/Datoteka:ForgattyusSajto01.jpg, Pristupio: 20.11.2021.
- [23] OCR12VM, Visokolegirani Cr-Mo alatni čelik, <https://steelselector.sij.si/steels/OCR12VM.html>, Pristupljeno: 18.11.2021. [
- [24] Landek D., Predavanje iz kolegija Toplinska obrada metala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2021. .
- [25] Landek D., Predavanja iz kolegija Toplinska obrada, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu , 2017.
- [26] Steel specifications DIN standards - X155CrVMo12-1, <https://www.westyorkssteel.com/files/steel-specifications-din-standards-x155crvmo12-1.pdf> Pristupio 20.11.2021.