

# Vrste toplinskih obrada i njihova primjena na dijelovima popljoprivredne tehnike

---

**Kraljević, Josip**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:*

**Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Agrobiotechnical Sciences Osijek /  
Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:151:400352>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-09**



Sveučilište Josipa Jurja  
Strossmayera u Osijeku

**Fakultet  
agrobiotehničkih  
znanosti Osijek**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Agrobiotechnical  
Sciences Osijek - Repository of the Faculty of  
Agrobiotechnical Sciences Osijek](#)



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET AGROBIOTEHNIČKIH ZNANOSTI OSIJEK

Josip Kraljević

Preddiplomski sveučilišni studij Poljoprivreda

Studij Mehanizacija

**Vrste toplinskih obrada materijala i njihova primjena na  
dijelovima poljoprivredne tehnike**

Završni rad

Osijek, 2020.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

FAKULTET AGROBIOTEHNIČKIH ZNANOSTI OSIJEK

Josip Kraljević

Preddiplomski sveučilišni studij Poljoprivreda

Studij Mehanizacija

**Vrste toplinskih obrada materijala i njihova primjena na  
dijelovima poljoprivredne tehnike**

Završni rad

Osijek, 2020.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

FAKULTET AGROBIOTEHNIČKIH ZNANOSTI OSIJEK

Josip Kraljević

Preddiplomski sveučilišni studij Poljoprivreda

Studij Mehanizacija

**Vrste toplinskih obrada materijala i njihova primjena na  
dijelovima poljoprivredne tehnike**

Završni rad

Povjerenstvo za ocjenu završnog rada:

1. Ivan Vidaković, mag.ing.mech., mentor
2. Prof.dr.sc. Goran Heffer, član
3. Doc.dr.sc. Vjekoslav Tadić, član

Osijek, 2020.

## TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

---

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku  
Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek  
Preddiplomski sveučilišni studij Poljoprivreda, smjer Mehanizacija

Završni rad

Josip Kraljević

### **Vrste toplinskih obrada materijala i njihova primjena na dijelovima poljoprivredne tehnike**

**Sažetak:** Cilj je ovog rada objasniti što je to toplinska obrada materijala, navesti postupke toplinske obrade materijala, objasniti promjene nastale toplinskom obradom te objasniti princip rada i tipove vakuumske peći. Promjenom toplinskog stanja mijenjaju se fazni sastav i struktura, a time i svojstva metala. Posljedice promjene su poboljšanje jednih svojstava, uz često pogoršanje drugih. Toplinskom obradom materijala najviše se obrađuju čelici. Budući da postupak toplinske obrade čelika može značajno poboljšati performanse dijelova od legure željeza, on ujedno obuhvaća i razna industrijska područja. (poljoprivreda, proizvodnja zrakoplova, proizvodnja betonskih proizvoda itd.) Proizvodi koji su bili podvrgnuti toplinskoj obradi, mogu raditi u uvjetima dinamičkog povećanog opterećenja i vibracija. Cementiranje osovina, vratila, zupčanika te kaljenje lemeša pluga najčešći su postupci toplinske obrade na dijelovima poljoprivredne tehnike.

**Ključne riječi:** Toplinska obrada, čelik, fazni sastav, vakuumske peći

37 stranica, 3 tablice, 30 slika, 27 literaturnih navoda

Završni rad pohranjen je u Knjižnici Fakulteta agrobiotehničkih znanosti u Osijeku i u digitalnom repozitoriju završnih i diplomskih radova Fakulteta agrobiotehničkih znanosti u Osijeku

## BASIC DOCUMENTATION CARD

---

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek  
Faculty of Agrobiotechnical Sciences Osijek  
Undergraduate university study Agriculture, course Mechanization

Final work

Josip Kraljević

### **Types of material heat treatment and their implementation in the field of agricultural machine components**

**Summary:** This research paper aims to clarify and elucidate what material heat treatment is, to adduce the procedure of material heat treatment, as well as to clarify changes incurred by the material heat treatment while elaborating on the concept and types of vacuum furnaces. Changes in the heat state induce changing of the phase structure and composition, along with characteristics of a certain metal. The repercussion of the aforementioned change is often enhancement of some, and degradation of other characteristics. Seeing that the heat treatment of steel may severely enhance performances of some parts of a steel alloy, the above-named treatment is used in various industrial fields such as agriculture, aircraft production, production of concrete products, and more. Products that underwent heat treatment can function in conditions of magnified encumbrance and vibrations. Cementing process of axles, shafts, cogs, and quenching of plows are the most often heat treatments on agricultural equipment.

**Key words:** Heat treatment, steel, phase composition, vacuum furnaces

37 pages, 3 tables, 30 figures, 27 references

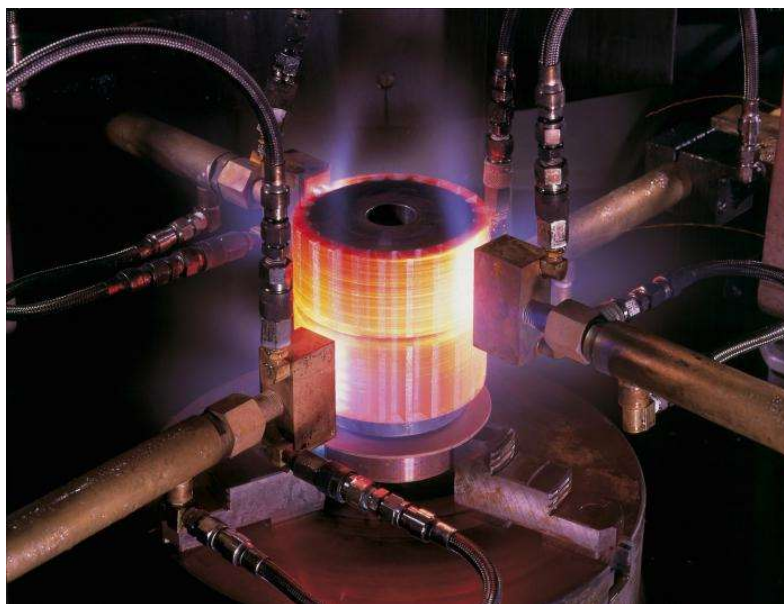
BSc Thesis is archived in Library of Faculty of Agrobiotechnical Sciences Osijek and in digital repository of Faculty of Agrobiotechnical Sciences Osijek

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. TOPLINSKA OBRADA .....	4
3. VRSTE TOPLINSKE OBRADÉ .....	6
3.1 Žarenje .....	6
3.2 Kaljenje.....	8
3.3 Popuštanje.....	11
3.4 Poboljšavanje ili oplemenjivanje .....	12
3.5 Cementiranje ili pougljičenje.....	13
3.6 Nitiranje ili dušičenje.....	14
3.7 Boriranje .....	20
4. TOPLINSKA OBRADA U VAKUUMSKIM PEĆIMA .....	21
4.1 Karakteristike vakuuma .....	21
4.2 Zagrijavanje .....	21
4.3 Hlađenje .....	23
4.4 Tipovi vakuumskih peći.....	26
4.5 Prednosti i nedostaci .....	29
5. TOPLINSKA OBRADA POLJOPRIVREDNIH DIJELOVA .....	31
5.1 Cementiranje osovina, vratila, zupčanika .....	31
5.2 Kaljenje dijelova poljoprivredne tehnike.....	33
6. ZAKLJUČAK.....	35
7. LITERATURA .....	36

## 1. UVOD

Toplinska obrada materijala važna je u pogledu poboljšavanja svojstava materijala. U praksi se izbor materijala vrši prema njegovim svojstvima (fizikalnim i mehaničkim). Često se tražena svojstva koja zadovoljava visokokvalitetni i skupi materijal (visokolegirani metali, superlegure ...) mogu postići izborom jeftinijega manje kvalitetnog materijala prikladnom toplinskom i mehaničkom obradom. Toplinskom obradom materijala najviše se obrađuju čelici. Važnost toplinske obrade govori činjenica da bilo koja konstrukcija, strojni dio ili uređaj, koji bi trebali biti poboljšani kako bi odgovarali zahtjevima za određeni dio, koristi toplinsku obradu kao alat za poboljšavanje svojstava navedenih dijelova. Toplinska obrada sastoji se u promjeni toplinskog stanja metala u krutom stanju. Promjenom toplinskog stanja mijenjaju se fazni sastav i struktura, a time i svojstva metala. Posljedice promjene su poboljšanje jednih svojstava, uz često pogoršanje drugih (npr. porast tvrdoće i čvrstoće, ali pad žilavosti i rastezljivosti) (Gabrić i Šitić, 2015.).

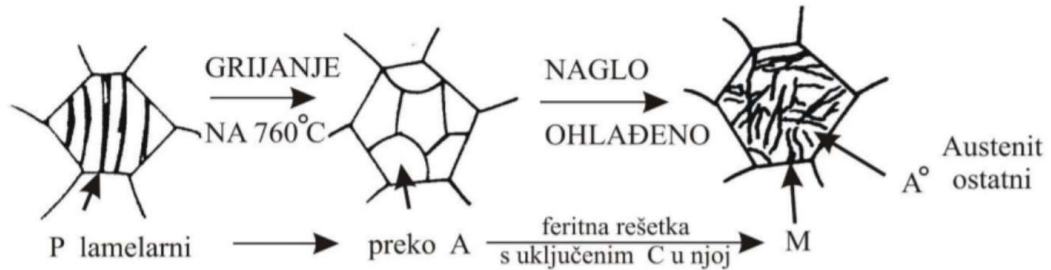


Slika 1. Kaljenje- toplinska obrada čelika

(Izvor: [https://puntomariner.com/images/heat-treatment-of-steel-and\\_5.jpg](https://puntomariner.com/images/heat-treatment-of-steel-and_5.jpg))

Promjene nastale toplinskom obradom mogu biti:

a) Promjena faza: umjesto perlita  $P = (\alpha^{id} + Fe_3C^{id})$  raspadom austenita  $A$  dobiju se neke nove faze (rešetka ferita s uključenim ugljikom). Dio austenita  $A$  može ostati nepretvoren (Gabrić i Šitić, 2015.). Na slici 2 prikazana je promjena faza.

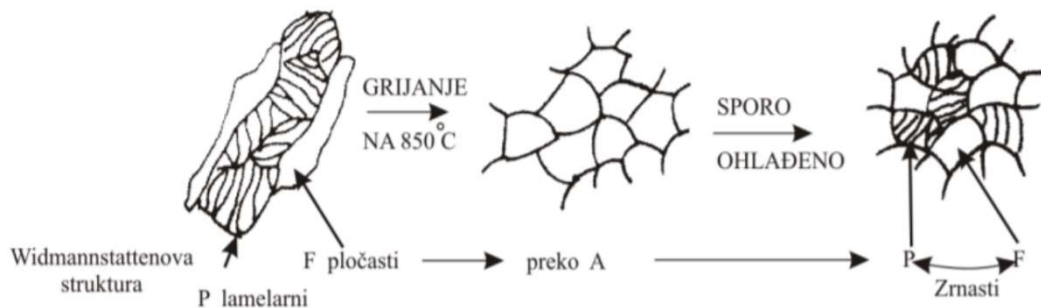


Slika 2. Promjena faza (fizičko-kemijske promjene)

$P$  - perlit,  $A$  - austenit,  $A^0$  – austenit (ostatni)

(Izvor: <https://loomen.carnet.hr/mod/resource/view.php?id=200866>)

b) Promjena strukture: hladno gnječena, usmjerena, sitna zrna žarenjem iznad temperature rekristalizacije postaju neusmjerena. Primarni krupni kristali (koji su posljedica sporog skrućivanja taline nakon postupka lijevanja ili zavarivanja) podesnom toplinskom obradom mogu se usitniti (Gabrić i Šitić, 2015.). Na slici 3 prikazana je promjena strukture.



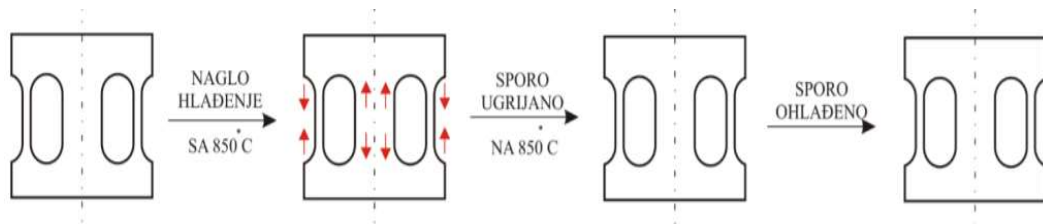
Slika 3. Promjene strukture (oblika i veličine zrna)

$P$  – perlit,  $A$  – austenit,  $F$  – ferit

(Izvor: <https://loomen.carnet.hr/mod/resource/view.php?id=200866>)



c) Promjena mehaničkog stanja: uklanjanje zaostalih napreznja nakon hladnog gnječenja ili naglog hlađenja izratka kompliciranog oblika (Slika 4.). Naknadnim sporim zagrijavanjem i sporim hlađenjem zaostala napreznja većim dijelom iščezavaju (Gabrić i Šitić, 2015.).

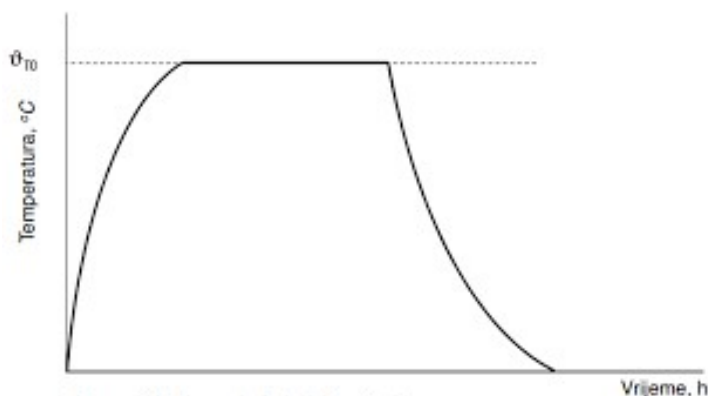


Slika 4. Promjena mehaničkog stanja

(Izvor: <https://loomen.carnet.hr/mod/resource/view.php?id=200866>)

## 2. TOPLINSKA OBRADA

Toplinska obrada predstavlja zagrijavanje materijala do određene temperature, držanje na toj temperaturi i hlađenje određenom brzinom pri čemu dolazi do promjene strukture materijala, a time i njegovih svojstava ([http://www.ss-tehnicka-ri.skole.hr/dokumenti?dm\\_document\\_id=407&dm\\_dnl=1](http://www.ss-tehnicka-ri.skole.hr/dokumenti?dm_document_id=407&dm_dnl=1)). Na slici 5 prikazan je dijagram toplinske obrade.



Slika 5. Dijagram toplinske obrade

(Izvor: [http://www.ss-tehnicka-ri.skole.hr/dokumenti?dm\\_document\\_id=407&dm\\_dnl=1](http://www.ss-tehnicka-ri.skole.hr/dokumenti?dm_document_id=407&dm_dnl=1))

Osnovni parametri toplinske obrade su temperatura ( $t$ ) i vrijeme ( $\tau$ ). Izvedeni parametri iz osnovnih su: brzina zagrijavanja, vrijeme progrijavanja, držanje na određenoj temperaturi, brzina hlađenja. Precizna kontrola temperature i vremena potrebna je za izradu visokokvalitetnih dijelova i komponenata s navedenim svojstvima. Stupanj hlađenja iz toplinske obrade pri visokoj temperaturi također je vrlo važan procesni parametar. Svi metali i legure mogu se termički obrađivati. Aluminijske legure se žare ili otapaju, zatim nastupa gašenje te dolazi do precipitacijskog očvršćivanja. Bakrene mjedene ili brončane legure se također obrađuju žarenjem i starenjem (precipitacijsko očvršćivanje). Čelici se termički obrađuju žarenjem, gašenjem i kaljenjem ili precipitacijskim očvršćivanjem (Slade, 2018.).

Gabrić i Šitić (2015.) navode da se danas koriste razni postupci toplinskih obrada. Njihov odabir ovisi o namjeni i svrsi obratka te kakve učinke i promjene na njemu želimo dobiti. Najčešće se dijele prema dubini do koje dopire utjecaj toplinske obrade. To je značajno i stoga što brojni elementi strojeva imaju izrazite zahtjeve samo na svojstva „površine“. Na slici 6 prikazana je podjela postupaka toplinske obrade.



Slika 6. Podjela postupaka toplinske obrade

(Izvor: <https://repositorij.fazos.hr/islandora/object/pfos%3A1805/datastream/PDF/view>)

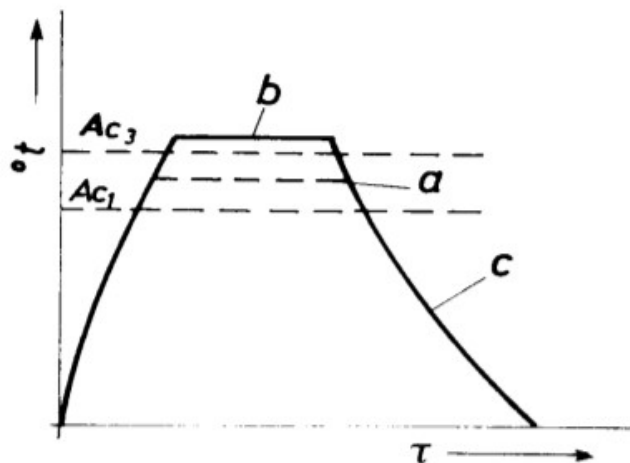
### 3. VRSTE TOPLINSKE OBRADE

#### 3.1 Žarenje

Žarenje se sastoji od zagrijavanja materijala do određene temperature, držanja na toj temperaturi i polaganog hlađenja. Hlađenje nakon žarenja provodi se sporo, najčešće na mirnom zraku. Izvodi se nakon hladne ili tople obrade deformiranjem kako bi se materijalu homogenizirala (izjednačila) struktura, omogućila daljna obrada i poboljšala mehanička svojstva.

Postupci žarenja:

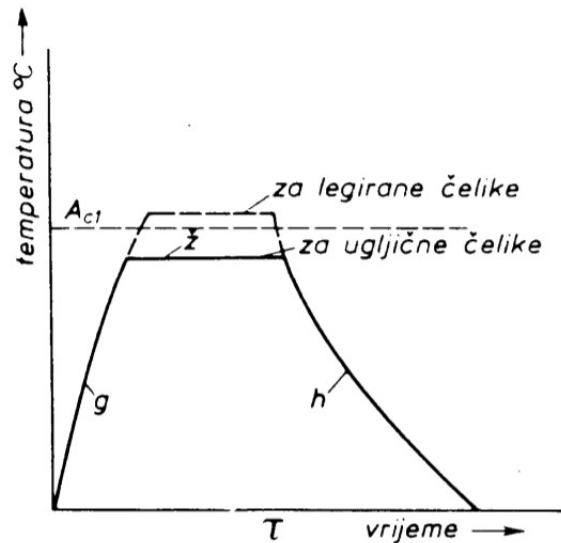
1. *Normalizacijsko žarenje*- izvodi se nakon lijevanja, zavarivanja i nakon plastične obrade metala u toplom stanju (kovanja, prešanja, valjanja toplim izvlačenjem i dr.). Normalizacijskim žarenjem postiže se jednolična i sitnozrnata struktura na predmetima čija struktura po presjeku nije homogena po veličini kristalnog zrna ili po fazama. Izvodi se zagrijavanjem nešto iznad  $A_{c3}$  (20-50 °C) za pondeutektoidne čelike (čelici s manje od 0.68% ugljika), a iznad  $A_{c1}$  za nadeutektoidne čelike (Slade, 2018.). Slika 7 prikazuje dijagram normalizacijskog žarenja.



Slika 7. Dijagram normalizacije

(Izvor: Slade, 2018. „Obrada materijala II“)

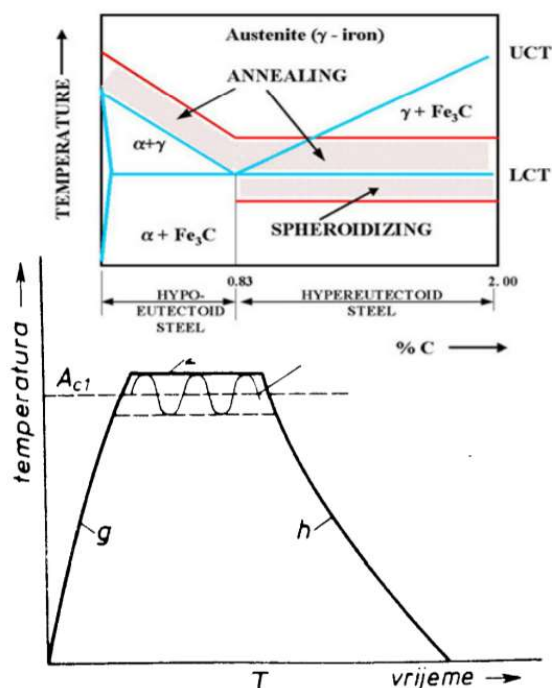
2. *Rekristalizacijsko žarenje*- Izvodi se nakon obrade metala u hladnom stanju (valjanjem, prešanjem, izvlačenjem i sl.). Kod plastične obrade na hladno dolazi do unutrašnjih napetosti i smanjenja kristalnog zrna što dovodi do povećane tvrdoće i čvrstoće te smanjenja žilavosti. Izvodi se zagrijavanjem legiranih čelika nešto iznad  $A_{c1}$ , a ugljičnih čelika ispod  $A_{c1}$  (450-600 °C). Nakon određenog vremena žarenja slijedi polagano hlađenje. Kod čelika dolazi do smanjenja napetosti, tvrdoće i čvrstoće, a povećanja žilavosti (Slade, 2018.). Na slici 8 prikazan je dijagram rekristalizacijskog žarenja.



Slika 8. Dijagram rekristalizacije

(Izvor: Slade, 2018. „Obrada materijala II“)

3. *Meko žarenje (sferoidizacija)*- Mekim žarenjem se poboljšavala obradivost materijala rezanjem. Sferoidizacijsko žarenje se provodi sa svrhom prevođenja karbida u kuglasti oblik kod predmeta koji su bili obrađivani na visokim temperaturama. Tanke stijenke poslije kovanja i normalizacije brže se hlade od debljih. Pri tome nastaje vrlo tvrda perlitna struktura u kojoj se cementit javlja u obliku lamelica. Obrada rezanjem takve strukture je vrlo teška, stoga se predmeti zagriju na temperaturu neposredno ispod  $A_{c1}$  (650-750 $^{\circ}\text{C}$ ), dugotrajno žare i sporo hlade. Pri tome lamelarni cementit prelazi u zrnati ili globularni raspoređen u feritnoj osnovi. Sada je znatno olakšana strojna obrada jer oštrica alata zadire samo u ferit dok se zrnca cementita „izmiču“ u stranu (oštrica ih ne siječe). Smanjuje se čvrstoća i tvrdoća, a poboljšava istežljivost (Slade, 2018.). Na slici 9 prikazan je dijagram mekog žarenja.



Slika 9. Sferoidizacija

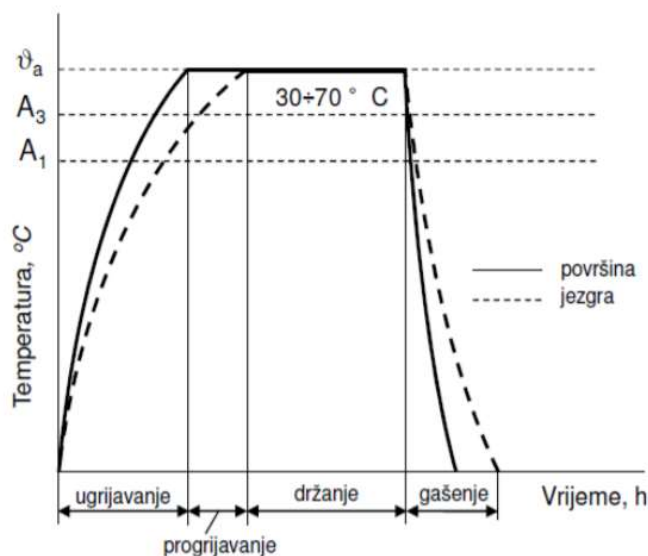
(Izvor: Slade, 2018. „Obrada materijala II“)

4. *Žarenje za redukciju napetosti (odgrijavanje)*- Izvodi se radi smanjenja toplinskih napetosti zaostalih nakon nekih predhodnih hlađenja (npr. nakon kovanja, lijevanja, zavarivanja, kaljenja). Napetosti nastaju i nakon hladne obrade deformiranjem i teške obrade rezanjem ili brušenjem. Čelični predmeti često se nalaze u stanju elastičnih naprezanja ( $\sigma < \sigma_{doz.}$ ). Ako se takav predmet podvrgne obradi rezanjem može se dogoditi da, zbog smanjenja površine presjeka, naprezanja prekorače dozvoljena naprezanja. Pri tome dolazi do deformacija koje se ne mogu tolerirati. Zato se prije strojne obrade provodi odgrijavanje. Ono se provodi zagrijavanjem čelika na 550 – 650 °C te sporim hlađenjem na sobnu temperaturu. Pri tome ne nastaju nikakve promjene strukture ([http://www.ss-tehnickari.skole.hr/dokumenti?dm\\_document\\_id=407&dm\\_dnl=1](http://www.ss-tehnickari.skole.hr/dokumenti?dm_document_id=407&dm_dnl=1))

### 3.2 Kaljenje

Kaljenje je toplinska obrada koja se sastoji od zagrijavanja materijala do određene temperature odnosno temperature austenitizacije (750-1000°C), ovisno o vrsti čelika, držanja na toj temperaturi i naglog hlađenja (gašenja). Nakon što se postigne ta temperatura

austenitizacije, čelik se drži na toj temperaturi te se naglo hladi. Hlađenje se može odvijati u vodi temperature 20°C ( ako bi bila niža temperatura došlo bi do pucanja izratka), ulju (temperatura 30-60°C), na zraku ili u nekom drugom sredstvu. Time se dobiva sitnozrnata struktura MARTENZIT te se povećava tvrdoća, a smanjuje žilavost. Čelik se može kaliti samo ako sadrži minimalno 0.35% C ([http://www.ss-tehnicka-ri.skole.hr/dokumenti?dm\\_document\\_id=407&dm\\_dnl=1](http://www.ss-tehnicka-ri.skole.hr/dokumenti?dm_document_id=407&dm_dnl=1)). Na slici 10 prikazan je dijagram kaljenja čelika.



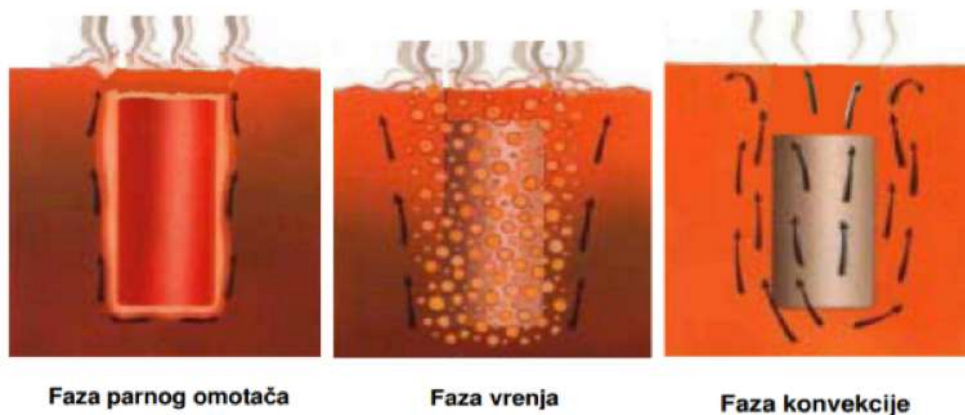
Slika 10. Dijagram postupka kaljenja nekog podeutektoidnog čelika

(Izvor: [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1329396769-0-prezentacija\\_mat\\_ii\\_to\\_pdf\\_bez\\_teksta.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1329396769-0-prezentacija_mat_ii_to_pdf_bez_teksta.pdf))

Kaljenje ima dva glavna cilja. Prvi glavni cilj je postizanje maksimalne moguće tvrdoće ovisno o udjelu ugljika u čeliku (Burnsov dijagram). Drugi glavni cilj je postizanje što jednoličnijeg prokaljenja odnosno što jednoličnije tvrdoće po poprečnom presjeku. Kao što smo prethodno rekli da bi dobili veliku tvrdoću trebamo ostvariti martenzitnu strukturu. Martenzitna struktura se dobiva kao posljedica jako brzog hlađenja. Kada brzina hlađenja nije dovoljno velika, s obzirom na veličinu predmeta, tada se oblikuju međustrukture poput bainita, sorbita, trosita. (Stupnišek, Cajner, 2001.)

Ulja, voda, polimeri i emulzije kod hlađenja stvaraju parni omotač, dok rastaljene soli, plinovi, fluidizirane kupke, tehnički plinovi, mirni i komprimirani zrak ne stvaraju parni omotač. Parni omotač djeluje kao izolator i sprječava kontakt sredstva za gašenje i metalne površine. Prilikom uranjanja vrućeg obratka u sredstvo za hlađenje koje stvara parni omotač

ohladiavanje se odvija u tri faze: faza parnog omotača, faza vrenja, faza konvekcije (Slade, 2018.). Na slici 11 prikazane su faze ohlađivanja obratka.



Slika 11. Faze ohlađivanja obratka

(Izvor: Slade, 2018. „Obrada materijala II“)

U fazi parnog omotača, koji nastaje po uranjanju vrućeg obratka u sredstvo za hlađenje, oko obratka se stvara parni omotač koji djeluje kao izolacija i spriječava hlađenje. Duljina trajanja ove faze ovisi o sredstvu gašenja. Snižavanjem temperature parni omotač postaje nestabilan i dopušta kontakt između obratka i sredstva gašenja. (Slade, 2018.)

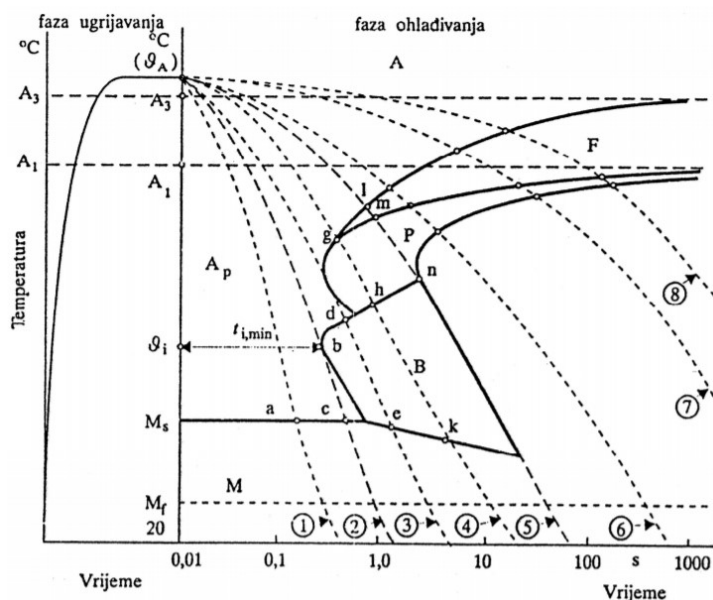
U fazi vrenja – vrenje sredstva za hlađenje brzo odvodi toplinu s predmeta. Prilikom vrenja mjehurići izlaze iz tekućine i na njihovo mjesto dolazi hladna tekućina – posljedica je brzo odvođenje topline. U ovoj fazi je maksimalna brzina hlađenja, ali se smanjenjem temperature smanjuje i vrenje. (Slade, 2018.)

U fazi konvekcije, pri temperaturi obratka nižom od temperature vrenja sredstva gašenja, toplina se odvodi samo izmjenom strujanja topline - konvekcijom sa sredstvom za hlađenje. Ovaj se postupak može ubrzati cirkulacijom sredstva gašenja ili gibanjem obratka kroz sredstvo. (Slade, 2018.)

Za praćenje kontinuiranog ohlađivanja austenitiziranog čelika u realnim uvjetima (u vodi, ulju ili na zraku) primjenjuje se tzv. kontinuirani TTT-dijagram (Slika 12.) (Time Temperature Transformation = vrijeme, temperatura, pretvorba). TTT dijagram vrijedi samo za jedan čelik i to onaj s kojim je snimljen (tj. čelik poznatog kemijskog sastava i temperature austenitizacije). TTT dijagram pokazuje transformacijska zbivanja u zadanom čeliku ako se čelik ohlađuje iz područja austenita različitim "brzinama hlađenja". Polja u



kontinuiranom TTT-dijagramu predstavljaju: F - pretvorbu austenita u ferit P - pretvorbu austenita u perlit B - pretvorbu austenita u bainit M - pretvorbu austenita u martenzit (Jalušić, 2009.). Na slici 12 prikazan je dijagram kontinuiranog ohlađivanja čelika.



Slika 12. TTT- dijagram kontinuiranog ohlađivanja.

(Izvor: [http://repositorij.fsb.hr/629/1/29\\_06\\_2009\\_Boris\\_Jalusic\\_Diplomski\\_Rad.pdf](http://repositorij.fsb.hr/629/1/29_06_2009_Boris_Jalusic_Diplomski_Rad.pdf))

### 3.3 Popuštanje

Gabrić i Šitić (2015.) navoda da je popuštanje postupak toplinske obrade koji se vrši nakon kaljenja zagrijavanjem čelika na neku temperaturu ispod temperature  $A_1$ . Ovim postupkom toplinske obrade vraćanja u ravnotežno stanje postiže se:

- eliminacija zaostalih naprezanja;
- povećanje žilavosti (eliminacijom krhkog tetragonalnog martenzita koji uopće nema izražena svojstva rastezljivosti i žilavosti);
- dimenzijska stabilnost izratka (pojava promjene dimenzije izražena je kod visokolegiranih alatnih čelika – zagrijavanjem ovih čelika, nakon kaljenja, već na nižim temperaturama dolazi do pretvorbe zaostalog austenita u martenzit i karbide popuštanja što je praćeno promjenom volumena/dimenzija).

Izradci složenog oblika, koji su samo zakaljeni, najčešće se u eksploataciji raspuknu. Kako bi se ova pojava izbjegla, nakon kaljenja vrši se toplinska obrada popuštanja čelika čime se teži ravnoteži faza (npr. struktura s feritom i perlitom) i mehaničkoj ravnoteži (uklanjanje zaostalih naprezanja nastalih kaljenjem). Rezultati koje popuštanje daje nakon kaljenja su da se smanjuje čvrstoća, tvrdoća i granica elastičnosti ( u odnosu na zakaljeno stanje), a povećava se žilavost i rastezljivost (u odnosu na zakaljeno stanje) (Gabrić i Šitić, 2015.)

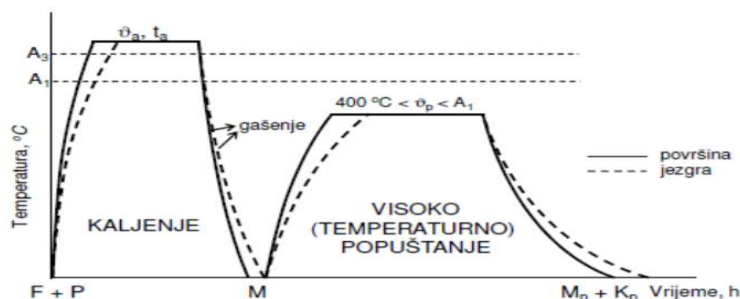
Ovisno o temperaturi, postupci obrade popuštanja dijele se na:

- visoko temperaturno popuštanje:  $t_{pop} < 220^{\circ}\text{C}$
- srednje temperaturno popuštanje:  $220^{\circ}\text{C} < t_{pop} < 400^{\circ}\text{C}$
- nisko temperaturno popuštanje:  $400^{\circ}\text{C} < t_{pop} < A_1$ .

Popuštanjem na višim temperaturama povećavaju se vrijednosti svih navedenih svojstava u odnosu na metastabilno stanje (prije kaljenja).

### 3.4 Poboljšavanje ili oplemenjivanje

Poboljšavanje je postupak toplinske obrade čelika koji se sastoji od kaljenja i visokog popuštanja. Ovom toplinskom obradom dobiva se sitnozrnata struktura veće čvrstoće i žilavosti. Tom se postupku podvrgavaju samo podeutektoidni čelici sadržaja ugljika od 0.3% do 0.6%. U praksi taj postupak nazivamo još i oplemenjivanje ([http://www.ss-tehnicka-ri.skole.hr/dokumenti?dm\\_document\\_id=407&dm\\_dnl=1](http://www.ss-tehnicka-ri.skole.hr/dokumenti?dm_document_id=407&dm_dnl=1)). Na slici 13 prikazan je dijagram postupka poboljšavanja.



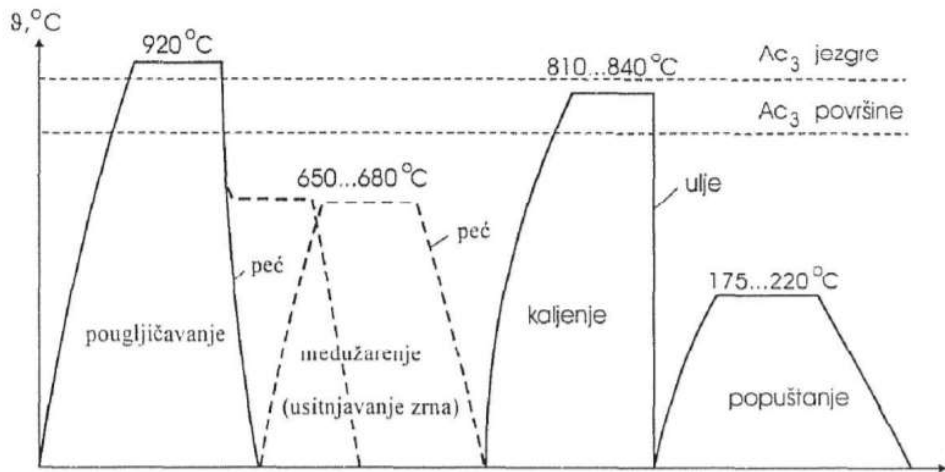
Slika 13. Dijagram postupka poboljšavanja čelika

(Izvor: [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1329396769-0-prezentacija\\_mat\\_ii\\_to\\_pdf\\_bez\\_teksta.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1329396769-0-prezentacija_mat_ii_to_pdf_bez_teksta.pdf))

Krajnji cilj ovog postupka predstavlja poboljšanje žilavosti i povišenja čvrstoće odnosno visine granice tečenja. Ti će rezultati biti bolji i doći više do izražaja, ako je čelik jednoličnije kaljen. Da bi se odstranila naprezanja, čelici se žare na od 860°C do 880°C, prije samog oplemenjivanja. Nakon toga slijedi kaljenje na temperaturi od 800°C do 900°C. Sljedeći korak je hlađenje i popuštanje. To se događa u peći ili u posebnom ulju. Ovaj postupak se koristi kod visoko opterećenih strojnih dijelova. Postoji razlika između običnog i međustepenog oplemenjivanja, tj. poboljšavanja. Obično se vrši s dvostrukim grijanjem, a međustepeno s jednokratnim. Čelik se prvo zagrije pa se naglo hladi. Na toj se temperaturi (650°C) drži određeno vrijeme i zatim se pusti da se ohladi u potpunosti. ( Stupnišek, Cajner, 2001.).

### **3.5 Cementiranje ili pougljičenje**

Postupak toplinske obrade koji se sastoji od termokemijske obradbe pougljičenja te kaljenja pougljičenog proizvoda i niskotemperaturnog popuštanja. Možemo reći da je cementiranje=pougljičenje + kaljenje + niskotemperaturno popuštanje. Osnovni cilj cementiranja je postizanje tvrdih površinskih slojeva strojnog dijela otpornih na trošenje, a da pritom jezgra strojnog dijela postigne što veću otpornost na udarna opterećenja (žilavost). Postupak cementiranja može se provoditi uz pougljičenje u različitim sredstvima: granulatu, solnoj kupki, fluidiziranoj kupki, plinskoj atmosferi ili ioniziranom plinu. Za cementiranje su najprikladniji ugljični i niskolegirani čelici s max. 0.25%C. Najčešći primjeri strojnih dijelova koji se podvrgavaju cementiranju su bregaste osovine automobila te zupčanci (naročito oni manji u zupčaničkom paru). Pougljičavanje (cementiranje) u užem smislu riječi je termokemijski postupak obogaćivanja ugljikom rubnih slojeva čelika. U širem smislu riječi cementiranjem se smatra kompleks postupka pougljičenja i kaljenja te niskog popuštanja (do ~220 °C). Pougljičavanje se izvodi austenitom u stanju čelika (Hlača, 2015.). Na slici 14 prikazan je dijagram postupka toplinske obrade cementiranja.



Slika 14. Shematski prikaz postupka cementiranja

(Izvor: <https://repozitorij.politehnika-pula.hr/islandora/object/politehnikapu%3A8/datastream/PDF/view>)

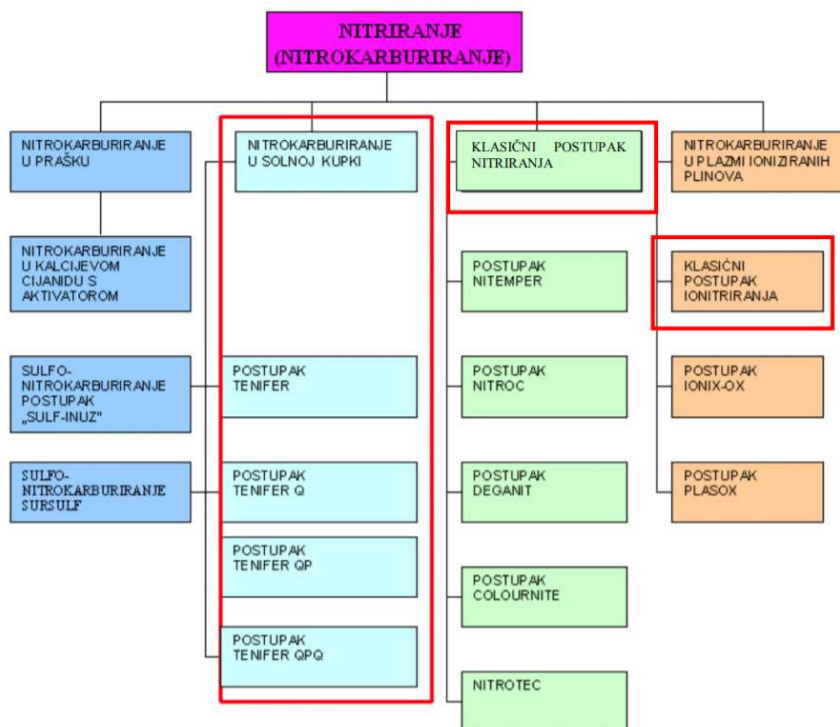
U praksi se riječju "cementiranje" najčešće obuhvaća proces u širem smislu riječi tj. proces pougljičenja i kaljenja. U cjelini gledano ne bi imalo nikakvog smisla pougljičavati neki predmet, a poslije toga ne kaliti, pa je s te strane opravdano cementiranjem smatrati kompletni postupak.

### 3.6 Nitiranje ili dušičenje

Nitiranje je toplinsko-kemijska obrada kod koje se čelik najprije toplinski obrađuje, a zatim površina obogaćuje dušikom. Nitirati se mogu sve vrste čelika i željeznih slitina, ali je učinak najveći kod čelika i slitina koji sadrže legirne elemente, koji stvaraju temperaturno stabilne nitride: krom, molibden, vanadij, aluminij i neki drugi. Postoji velik broj vrsta čelika koji sadrže prva tri kemijska elementa, prvenstveno radi drugih razloga (prokaljivost, otpornost prema popuštanju itd.), pa je zato nitiranje primjereno relativno velikom broju konstrukcijskih i alatnih čelika. Posebno su za nitiranje primjereni čelici legirani aluminijem. ( Matković T., Matković P., 2011.)

Nitiranje se može provoditi u prašku, solnim kupkama (npr. postupak „Tenifer“), plinu i u plazmi ioniziranih plinova. Svaki od navedenih postupaka daje konkretna svojstva i strukturu rubnog sloja. Svojstva nitiranih dijelova dijelova: povišena površinska tvrdoća, povećana otpornost na (adhezijsko) trošenje, povećana otpornost na koroziju, dobra otpornost trošenju na povišenim temperaturama (500-550 °C), otpornost toplinskom umoru,

povećana dinamička izdržljivost, male ili zanemarive deformacije obratka. Na slici 15 prikazana je podjela postupaka nitriranja.



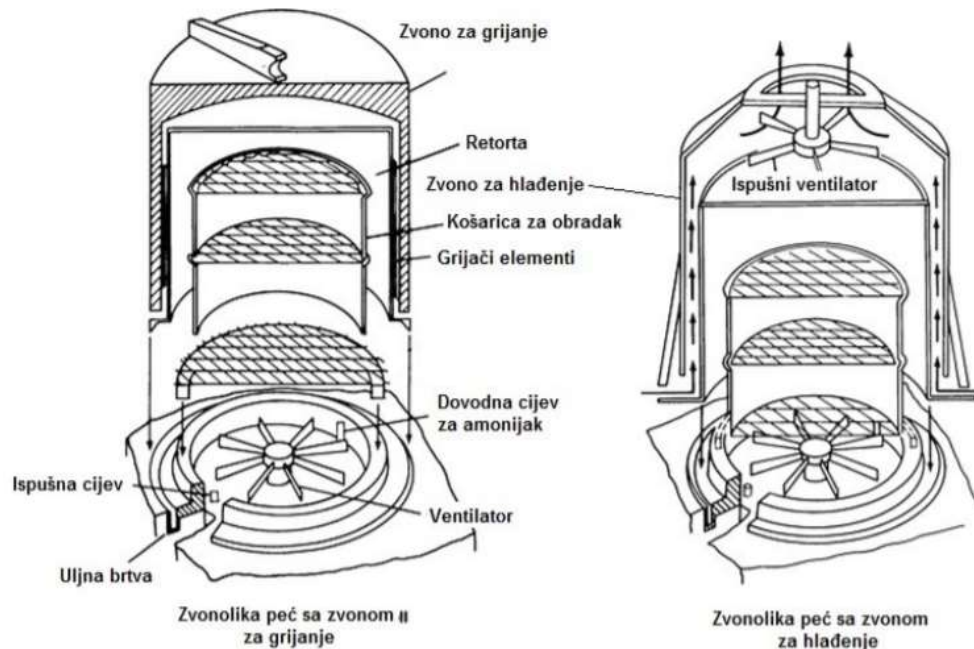
Slika 15. Pregled postupaka nitriranja (Nitrokarburiranja)

(Izvor: <https://repositorij.vuka.hr/islandora/object/vuka%3A1016/datastream/PDF/view>)

*Plinsko nitriranje*- toplinsko-kemijski postupak gdje disocijacijom amonijaka dušik difundira u površinu željezne legure pri temperaturama 495-565 °C gdje tvori nitridne slojeve. Postoje dvije uobičajene metode plinskog nitriranja, jednostruko i dvostruko. U jednostrukom nitriranju koriste se temperature od 495-525 °C i stupanj disocijacije se kreće od 15 do 30%. Ovaj postupak proizvodi krhak, dušikom bogat bijeli sloj na površini obratka. Dvostruki postupak nitriranja, također zvan i FLOE® proces, ima prednost naknadnog smanjenja debljine bijelog nitridnog sloja. Prvi korak u dvostrukom postupku nitriranja je osim po vremenu, identičan jednostrukom postupku. Drugi korak započinje podizanjem temperature na 550-565 °C, dok je stupanj disocijacije povećan na 65-80% (poželjno 75-80%). Općenito, za dostizanje tako visokih stupnjeva disocijacije u drugom koraku, potreban je vanjski disocijator amonijaka. (Literatura 15.)

Peći za nitriranje, prikazane na slici 16, izvode se od vatrootpornog čelika (X15 CrNiSi 25 20 s oko 2,0 %Si) koji nije u stanju apsorbirati dušik. Naprave i stalci za peć

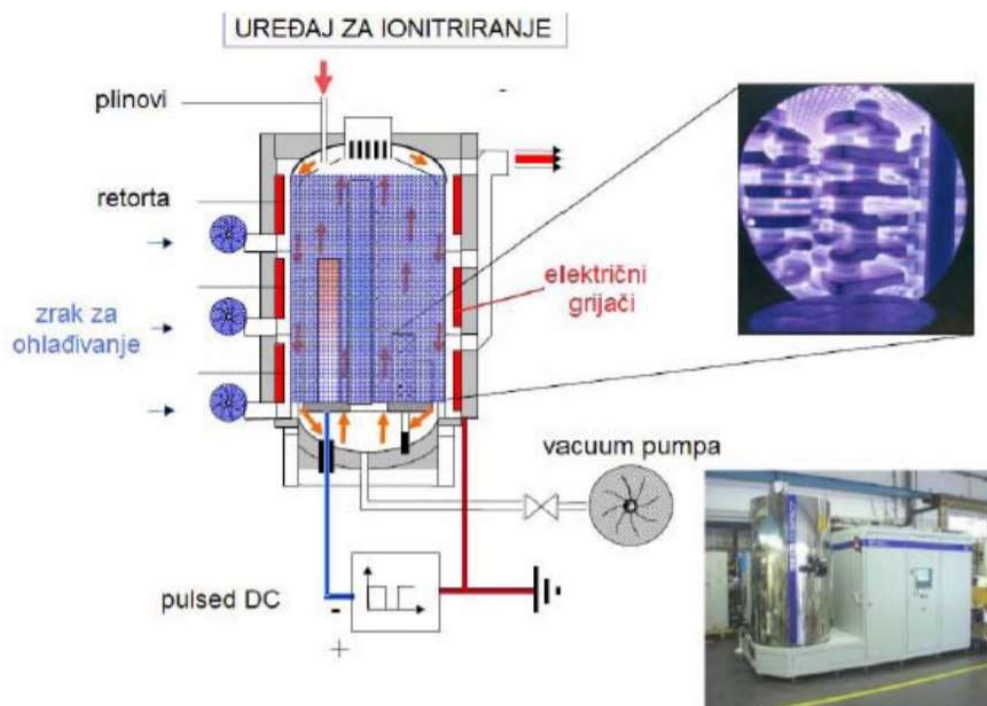
izrađuju se od Ni-legure ili od istog vatrootpornog čelika. Prije nitriranja retortu treba ispirati amonijakom sve dok udio zraka ne padne ispod 3%. Nakon toga treba povisiti temperaturu retorte na 500-550 °C i u nju uvesti NH<sub>3</sub> pod tlakom od 250 Pa te obično stupnjem disocijacije 15-30%. (Tadić, 2012.)



Slika 16. Shema zvonolike peći za plinsko nitriranje

(Izvor: ASM Handbook Volume 5, Surface Engineering, ASM International, 1994.)

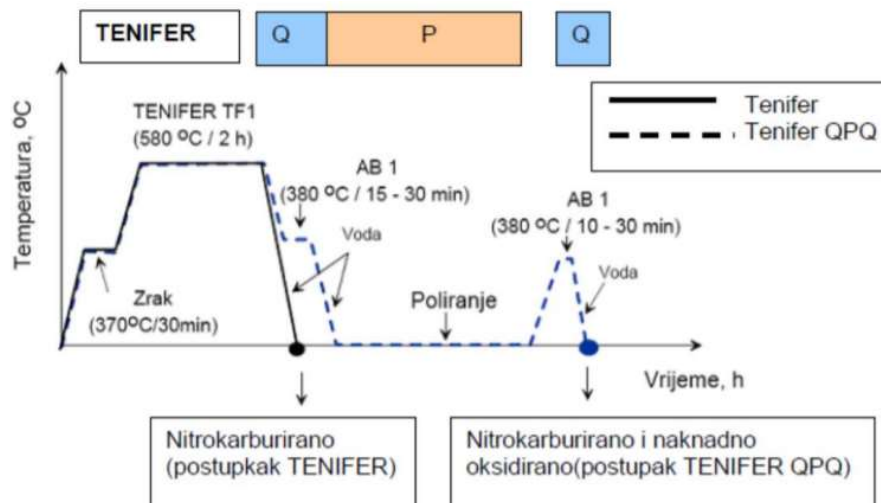
Nitriranje u plazmi- Plazma nitriranje, također poznato i kao ionitiranje je plinsko nitriranje pospješeno izbojima plazme na dijelu koji želimo nitrirati. Plazma je plin koji kad se izloži električnom potencijalu postaje ioniziran i svijetli. Dijelovi koji se nitriraju su katoda, a zidovi peći su anoda. Postupci ionizacije prvi puta su primjenjeni 60-ih godina 20. stoljeća. Ionitiranje je poboljšana verzija poznatih postupaka nitriranja koristeći se mehanizmom izbijanja iona. U vakuumu, električna energija visokog napona koristi za stvaranje ionizirane atmosfere za stvaranje plazme preko koje ubrzavaju dušikovi ioni prema dijelovima obradka (ASM Handbook, 1991.). Na slici prikazan je shematski prikaz uređaja ionsko nitriranje.



Slika 17. Shematski prikaz uređaja za ionsko nitiranje

(Izvor: [http://repositorij.fsb.hr/1269/1/15\\_02\\_2011\\_DOMAGOJ\\_AUGUSTA\\_-\\_zavrzni\\_rad.pdf](http://repositorij.fsb.hr/1269/1/15_02_2011_DOMAGOJ_AUGUSTA_-_zavrzni_rad.pdf))

Nitriranje u solnim kupkama- Nitriranje (odnosno nitrokarburiranje) u solnoj kupki, poznatiji kao TENIFER® postupak (Slika 18.), jedan je od najjednostavnijih i najraširenijih postupaka toplinsko-kemijske obrade. Postupak je poznat i pod nazivom TUFFTRIDE®, a u Americi je poznat pod nazivom MELONITE. Osim samog postupka nitriranja TENIFER, postoje varijante: TENIFER Q, TENIFER QP, TENIFER QPQ. Slova u nazivu Q potječu od engleskih riječi „quenching“ (gašenje), P – polishing (poliranje) i odnose se na naknadnu obradu. Tako postupak TENIFER QPQ označuje da je na nekom obratku bilo provedeno nitriranje i naknadna oksidacija. Solna kupka u kojoj se vrši nitriranje sastoji se od soli TF1, dok u kupci u kojoj se vrši hlađenje i naknadna oksidacija je sol AB1. ([http://repositorij.fsb.hr/1269/1/15\\_02\\_2011\\_DOMAGOJ\\_AUGUSTA\\_-\\_zavrzni\\_rad.pdf](http://repositorij.fsb.hr/1269/1/15_02_2011_DOMAGOJ_AUGUSTA_-_zavrzni_rad.pdf))



Slika 18. Dijagram postupka Tenifer i Tenifer QPQ

(Izvor: [http://repozitorij.fsb.hr/1269/1/15\\_02\\_2011\\_DOMAGOJ\\_AUGUSTA\\_-\\_zavrzni\\_rad.pdf](http://repozitorij.fsb.hr/1269/1/15_02_2011_DOMAGOJ_AUGUSTA_-_zavrzni_rad.pdf))

Nitriranje u solnim kupkama provodi se uranjanjem i držanjem obratka u solima koje sadrže cijanide ( $\text{NaCN}$ ) uz dodatak kalijeva cijanata ( $\text{KCNO}$ ).

Udio cijanata u solnoj kupki treba biti oko 38 % CNO. Tijekom postupka nitriranja dolazi do reakcije između površine obratka i alkalijevih cijanata što dovodi do stvaranja alkalijevog karbonata i u manjoj količini cijanida u iznosu od 0,5 – 4 % CN. Postupak nitriranja se sastoji od nekoliko faza (Slika 18.). Prva faza je predgrijavanje na zraku pri temperaturi 350 – 400 °C u vremenu trajanja od 30 minuta. Zatim slijedi nitriranje u solnoj kupki TF1 pri temperaturi 580 °C u vremenu trajanja od dva sata i zatim ohlađivanje obratka u oksidativnoj kupki AB1 pri temperaturi 380 °C. Kupka AB1 osim što hladi obradak, ima i niz drugih prednosti, kao što su: ([http://repozitorij.fsb.hr/1269/1/15\\_02\\_2011\\_DOMAGOJ\\_AUGUSTA\\_-\\_zavrzni\\_rad.pdf](http://repozitorij.fsb.hr/1269/1/15_02_2011_DOMAGOJ_AUGUSTA_-_zavrzni_rad.pdf))

- oksidacijsko djelovanje pri čemu nastaje crni željezni oksidni sloj (magnetit),
- pozitivan utjecaj na dimenzijsku stabilnost (mala mogućnost da dođe do pucanja).

U usporedbi s ostalim postupcima nitrokarburiranja, TENIFER postupak je vrlo lagan za provođenje. Postupak se može obaviti ručno ili u potpuno automatiziranim postrojenjima. Na slici 19. uočavamo moderno opremljen, potpuno automatiziran pogon za

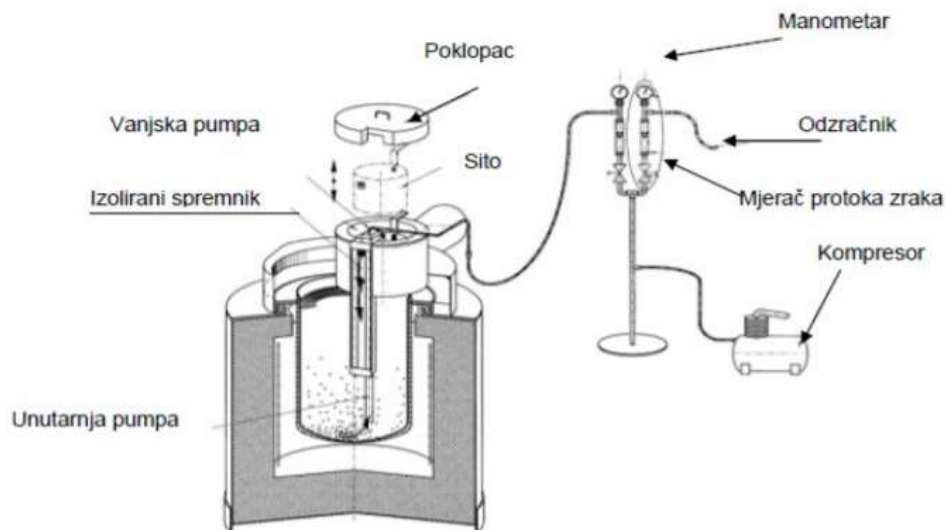


nitrokarburiranje u soli, a na slici 20. se nalazi suvremena izvedba kupke za nitriranje sa sitom za filtriranje rastaljene soli. (Tadić, 2012.)



Slika 19. Automatizirana linija za nitrokarburiranje Tenifer QPQ postupkom

(Izvor: [http://repositorij.fsb.hr/1635/1/09\\_02\\_2012\\_Tadic\\_diplomski.pdf](http://repositorij.fsb.hr/1635/1/09_02_2012_Tadic_diplomski.pdf))



Slika 20. Solna kupka za nitro karburiranje sa sitom za automatizirano filtriranje rastaljene soli

(Izvor: [http://repositorij.fsb.hr/1635/1/09\\_02\\_2012\\_Tadic\\_diplomski.pdf](http://repositorij.fsb.hr/1635/1/09_02_2012_Tadic_diplomski.pdf))

### 3.7 Boriranje

Boriranje je postupak kod kojeg na povišenim temperaturama atomi bora, zahvaljujući malom promjeru i velikoj mobilnosti, difundiraju u površinske slojeve, tvoreći s atomima osnovnog materijala jednofazne ili višefazne intermetalne spojeve. Nastali spojevi, boridi, iznimno su visoke tvrdoće, što boriranim površinama daje visoku otpornost na abrazijsko trošenje. Osim toga, boriranjem se povećava i otpornost na adhezijsko trošenje te postojanost na koroziju uslijed djelovanja kiselina. Sve navedeno znači, da je uz pravilan izbor parametara boriranja te uz pravilan odabir materijala i debljine boridnog sloja ovim postupkom moguće produljiti radni vijek strojnih elemenata za 3 do 10 puta. (Horgas, 2016.)

Boriranje se provodi u prašku (granulatu), pasti (pogodno za lokalno boriranje), plinskim atmosferama (vrlo otrovan i rijetko primjenjiv postupak), solnim kupkama te u plazmi ioniziranih plinova. Dubine boridnih slojeva su od nekoliko desetaka  $\mu\text{m}$  do 0.3 mm. Tvrdoće boridnih slojeva iznose oko 2000 HV. Najbolji rezultati boriranja ostvaruju se na nelegiranim i niskolegiranim čelicima iako se ono provodi i na visokolegiranim čelicima, ljevovima i legurama na bazi Ni, Co, Ti, W, Mo i sl. Boriranje nelegiranih čelika provodi se na temperaturama 800 do 1050 °C, najčešće u trajanju od 1 do 12 h.

Prednosti boriranja:

1. Visoka tvrdoća boridnih površina,
2. Postojanost tvrdoće na povišenim temperaturama,
3. Visoka otpornost na trošenje (abrazija, adhezija, erozija..),
4. Velika postojanost na djelovanje neoksidirajućih kiselina,
5. Mogućnost toplinske obrade nakon boriranja,
6. otpornost na agresivno djelovanje rastaljenih metala (Horgas, 2016.),

Nedostaci boriranja:

1. Skuplji postupak od cementiranja i nitriranja,
2. Promjena dimenzija prilikom boriranja,
3. Zanemarivo povećanje otpornosti na zamor materijala
4. Negativan utjecaj na dinamičku izdržljivost (Horgas, 2016.).

## 4. TOPLINSKA OBRADA U VAKUUMSKIM PEĆIMA

### 4.1 Karakteristike vakuuma

Vakuuum služi kao zaštitna atmosfera u procesu toplinske obrade. Postižemo ga pomoću različitih crpki, a svaka vakuumska peć ih ima nekoliko. Iznos vakuuma koje one ostvaruju je najčešće od  $10^{-3}$  do  $10^{-5}$  bar-a, a vakuum koji je moguće postići je i do  $10^{-6}$  bar-a. U usporedbi s konvencionalnom toplinskom obradom, tehnologija obrade vakuumske toplinske obrade ne može postići nikakvu oksidaciju, ne dekarburiranje, nema istodobno naugljičenje, može ukloniti fosforni čip na površini obratka i imati odmašćivanje i otplinjavanje kako bi se postigao učinak sjajnog pročišćavanja površine.

U tablici 1 prikazana je podjela „vakuuma“ u tri grupe. To su grubi vakuum, srednji vakuum i fini vakuum. Grubi vakuum se koristi prilikom toplinske obrade nelegiranih čelika. Srednji vakuum se koristi za toplinsku obradu legiranih alatnih čelika i nehrđajućih čelika, a fini vakuum se koristi za toplinsku obradu nehrđajućih čelika, koji su legirani Ti, i alata prevučeni CVD prevlakama. (Faltis, 2011.)

Tablica 1. Vrste vakuuma i njihova primjena u toplinskoj obradi vakuumskim pećima

(Izvor: [http://repositorij.fsb.hr/1189/1/03\\_02\\_2011\\_ZAVRSNI\\_RAD.pdf](http://repositorij.fsb.hr/1189/1/03_02_2011_ZAVRSNI_RAD.pdf))

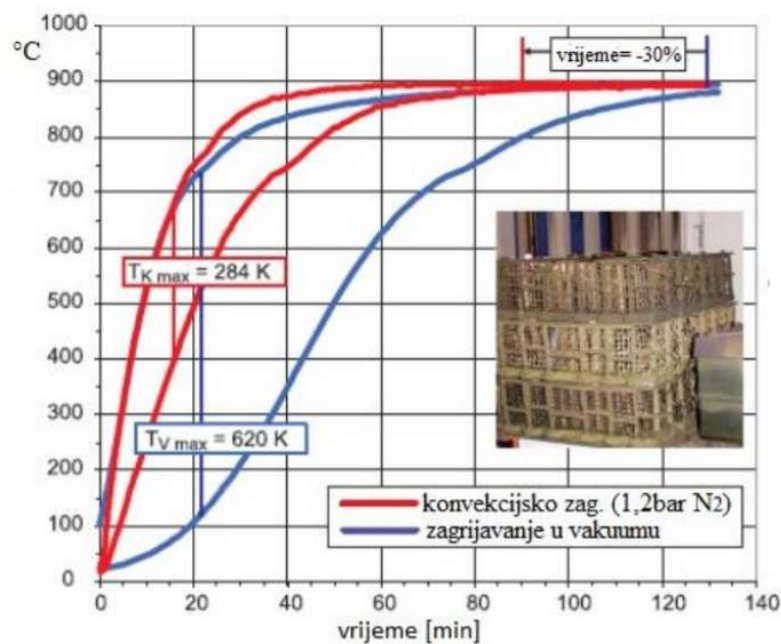
Vrsta vakuuma	P,mbar	Primjena kod toplinske obrade
Grubi vakuum	1000... 1	Nelegirani čelici (kaljenje, cementiranje)
Srednji vakuum	1... $10^{-3}$	Legirani alatni čelici Nehrđajući čelici (osim legiranih Ti)
Fini vakuum	$10^{-3}$ ... $10^{-6}$	Nehrđajući čelici (legirani Ti) Alati prevučeni CVD prevlakama

Uređaji za postizanje vakuuma su: mehanička rotacijska pumpa, difuzijska pumpa, turbomolekularne pumpe, ionska pumpa, kriogenske pumpe, sublimacijske pumpe.

### 4.2 Zagrijavanje

Zagrijavanje u vakuumskim pećima se vrši zračenjem odnosno radijacijom. Radna temperatura iznosi od  $1100^{\circ}\text{C}$  do  $1500^{\circ}\text{C}$  (temperatura austenitizacije ili homogenizacije). Kako bismo imali jednoliku temperaturu po čitavom volumenu komore, vrlo je važna

pravilna izrada komore za zagrijavanje kao i pravilan izbor materijala. Isisavanjem zraka i ostalih plinova sriječava se zagrijavanje konvekcijom. Neke vakuumske peći imaju poseban ventilator za ubacivanje inertnih plinova. Najčešće je to dušik (N<sub>2</sub>) koji kruži oko šarže i omogućava konveksijsko ugrijavanje. Prednosti ugrijavanja uz prisutstvo inertnog plina su izbjegavanje selektivnog otparivanja legirnih elemenata i ubrzavanje ugrijavanja šarže zbog toga što se ugrijavanja sada vrše i zračenjem i konvekcijom. (Faltis, 2011.). Na slici 21 prikazan je dijagram ugrijavanja šarže u vakuumu.

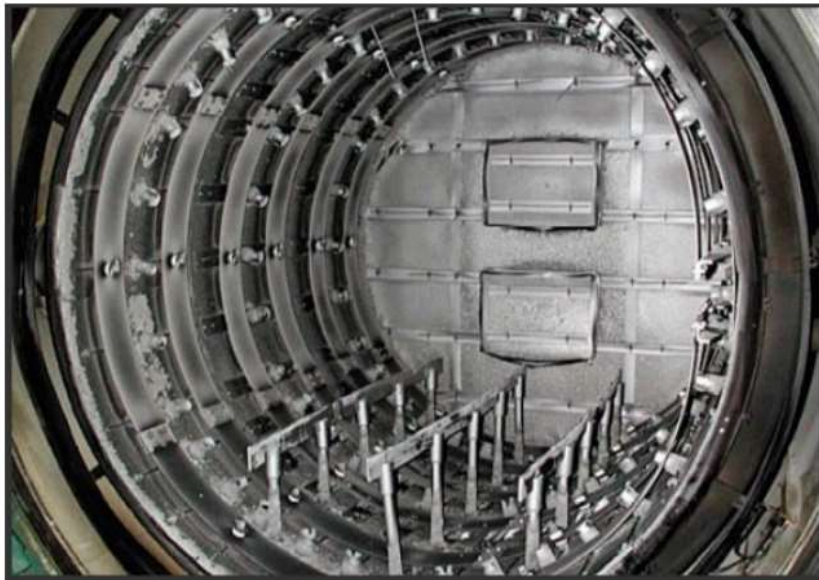


Slika 21. Usporedba krivulja ugrijavanja šarže u vakuumu u odnosu na konveksijsko ugrijavanje)

(Izvor: [http://repozitorij.fsb.hr/1189/1/03\\_02\\_2011\\_ZAVRSNI\\_RAD.pdf](http://repozitorij.fsb.hr/1189/1/03_02_2011_ZAVRSNI_RAD.pdf))

Konstrukcija za zagrijavanje koja obavlja šaržu može biti izrađena od metalnih šipki, cijevi ili ploča, vlaknastog dielektrika ili od njihove kombinacije. Metalni dijelovi konstrukcije su izrađeni od nehrđajućeg čelika i/ili vatrootpornog metala. Najčešći vatrootporni metali su molibden ili tantal. Elementi (grijači) koji se koriste za ugrijavanje najčešće su metalni ili grafitni. Vlaknasta konstrukcija, koja najčešće sadrži grafitna ili keramička vlakna, je veoma isplativa zbog manje cijene, dužeg životnog vijeka i velike otpornosti na toplinske šokove. Temperatura se unutar komore za zagrijavanje mjeri pomoću temperaturnih senzora, termoparova. Oni daju preciznu informaciju o temperaturi unutar komore što omogućuje točno mjerenje vremena zagrijavanja i držanja na temperaturi

termičke obrade. Podaci o temperaturi se učitavaju u računalo, što obradu čini visoko automatiziranom i programabilnom (Novak, 2018.). Na slici 22 prikazana je komora za ugrijavanje za grafitnim elementima.



Slika 22. Prikaz komore za ugrijavanje s grafitnim elementima

(Izvor: [http://repositorij.fsb.hr/1189/1/03\\_02\\_2011\\_ZAVRSNI\\_RAD.pdf](http://repositorij.fsb.hr/1189/1/03_02_2011_ZAVRSNI_RAD.pdf))

### 4.3 Hlađenje

Hlađenje u vakuumskim pećima se provodi pomoću struje stlačenog plina, ali postoje i izvedbe s posebnim komorama za hlađenje u ulju. Hlađenje se ostvaruje strujanjem plina oko uzorka. Brzina hlađenja je veća od hlađenja na mirnom zraku, ali sporija od hlađenja u ulju. Pojedini tipovi vakuumskih peći imaju posebnu komoru u kojoj se odvija hlađenje otpada što dodatno ubrzava proces hlađenja. Najčešće korišteni plinovi za ohlađivanje su argon, dušik, helij i u nekim slučajevima vodik (Faltis, 2011.). U tablici 2 prikazana su fizikalna svojstva plinova koji se koriste za hlađenje.

Tablica 2. Fizikalna svojstva plinova: vodika, dušika, helija i argona (Izvor: [http://repositorij.fsb.hr/1189/1/03\\_02\\_2011\\_ZAVRSNI\\_RAD.pdf](http://repositorij.fsb.hr/1189/1/03_02_2011_ZAVRSNI_RAD.pdf))

<i>Fizikalna svojstva plinova vodika, helija, dušika i argona</i>				
Svojstva	Vodik	Helij	Dušik	Argon
Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )	0.303	-0.601	4.207	6.008
Spec. Toplina (J/Kg/K)	14450	5200	1050	520
Top. Vodljivost (x10 <sup>4</sup> W/(mK))	2256	1901	326	222
Dinamička viskoznost (x10 <sup>6</sup> Ns/m <sup>2</sup> )	10.8	24.4	21.6	28.2

Utjecajni čimbenici na intenzivnost hlađenja u plinu su:

1. Vrsta plina,
2. Brzina strujanja,
3. Tlak plina,
4. Vrsta strujanja,
5. Kut nastrojavanja (Faltis, 2011.).

Faza hlađenja je nužna pri toplinskoj obradi predmeta te nam je nužno omogućiti dovoljno brzo hlađenje sa što jednoličnijim i manjim deformacijama. Zbog toga danas poznajemo 5 osnovnih tipova suvremenih sustava za ohlađivanje u plinu:

1. Ohlađivanje obodno-radijalnim strujanjem plina visokog pritiska

Ovaj tip suvremenih sustava za hlađenje u plinu je pogodan za velike i masivne obradke. Kod šarži sa sitnim predmetima u središtu šarže nastaju zavjetrine i smanjeno ohlađivanje (Faltis, 2011.).

2. Hlađenje ciklički promjenjivim strujanjem plina odozgo-odozdo ili horizontalno

Ovim sustavom za hlađenje svakih 10 do 15 sekundi se mijenja smjer strujanja plina pod tlakom. Plin može strujati u vertikalnom smjeru ili može strujati u horizontalnom smjeru mijenjajući smjer s lijeva na desno i s desna na lijevo. Ovim se izbjegavaju deformacije kod letećih vitkih materijala koje bi nastale intenzivnim hlađenjem samo s jedne, npr. gornje strane (Faltis, 2011.).

### 3. Hlađenje horizontalno oscilirajućim strujanjem plina

Ovaj način hlađenja je sličan prethodnome (promjene strujanja u vertikalnom smjeru), ali je razlika u tome što kod hlađenja horizontalno oscilirajućim strujanjem plina događa se dodatna oscilacija u horizontalnom smjera (Faltis, 2011.).

### 4. Hlađenje cikličkim promjenjivim obodno-radijalnim strujanjem plina

### 5. Hlađenje u hladnoj komori

Postoje različiti faktori koji otežavaju povećanje intenziteta hlađenja kod vakuumskih peći. Jedan od otežavajućih faktora je visok toplinski kapacitet zagrijane komore koja se mora ohladiti zajedno sa šaržom. Drugi otežavajući faktor je da dio plina koji struji oko same šarže smanjuje efikasnost hlađenja. Još jedan otežavajući faktor je da se dijelovi malog presjeka ohlade brže nego zidovi peći pa zračenje zidova na njih smanjuje efekt hlađenja. Posljednji otežavajući faktor je vezan za energiju motor-ventilatora (turbine od više desetaka kW) koja se velikim dijelom pretvara u toplinu koju treba odvesti. (Faltis, 2011.)

Osim ohlađivanja u plinu ili smjesi plinova postoje i izvedbe vakuumskih peći za ohlađivanje u ulju. Na odabira ulja za hlađenje u vakuumskim pećima postavljeni su iznimno visoki zahtjevi. Ulje mora imati zadovoljene sljedeće karakteristike:

1. Izrazito visoku otpornost na isparavanje,
2. Nizak kapacitet apsorpcije plinova,
3. Visoku sposobnost otplinjavanja,
4. Izrazito visoku čistoću.

U tablici 3, prikazani su viskozitet i temperatura ulja za hlađenje.

Tablica 3. Viskozitet i temperature ulja pri radu za tri tipa ulja tvrtke Hughton.

(Izvor: [http://repozitorij.fsb.hr/1189/1/03\\_02\\_2011\\_ZAVRSNI\\_RAD.pdf](http://repozitorij.fsb.hr/1189/1/03_02_2011_ZAVRSNI_RAD.pdf))

<i>Oznaka</i>	<i>Viskozitet pri 40°C (mm<sup>2</sup>/s)</i>	<i>Temperature uporabe</i>
VACUQUENCH B 244	28	30-70 °C
VACUQUENCH 305	30	40-80 °C
VACUQUENCH 605	35	50-150 °C

Vacuquench 605 se npr. koristi za hlađenje ležaja izrađenih od čelika, različitih alata i brzoreznih čelika koji zbog veličine možda neće biti prikladni za hlađenje stlačenim plinom.

#### 4.4 Tipovi vakuumskih peći

##### 1. Horizontalne jednokomorne vakuumske peći

Horizontalne jednokomorne peći s prednjim punjenjem jedan su od najčešćih oblika vakuumskih peći prisutnih u upotrebi. Za njihovo punjenje uglavnom se koriste viličari, a veličine obrađivanih predmeta variraju od malih, koji su ili stegnuti ili utovareni u košarama, pa sve do predmeta velikih dimenzija kao što su zupčanici korišteni za motore brodova te plinske turbine. Generalno gledajući, horizontalne jednokomorne peći imaju više – manje jednostavnu konstrukciju, niže su cijene te vrlo fleksibilne u smislu proizvodnje, ali se u masovnoj proizvodnji obično upotrebljavaju drugi oblici vakuumskih peći (Faltis, 2011.). Na slici 23 prikazane su horizontalne jednokomorne vakuumske peći.



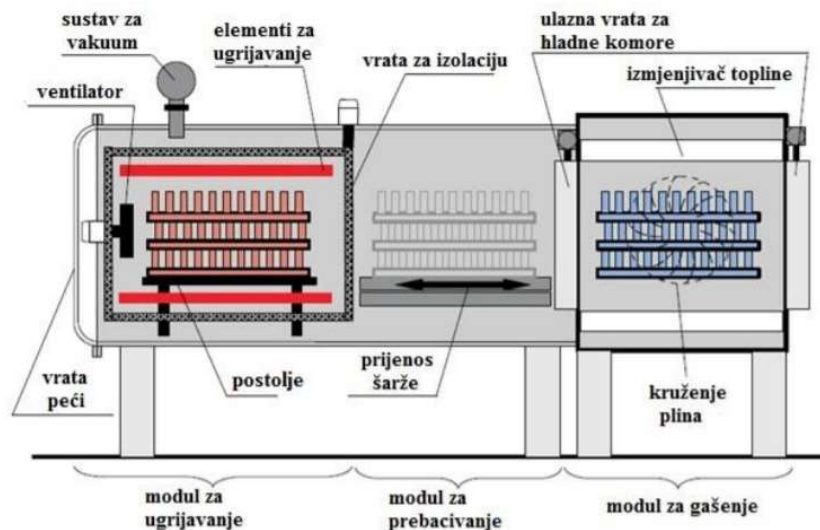
Slika 23. Horizontalne jednokomorne peći

(Izvor: <http://hr.vacuumfurnacetechn.com/uploads/201919246/vacuum-tempering-furnace-with-cooling-system34206986381.jpg>)



## 2. Horizontalne višekomorne peći

Karakterizira ih odvojena komora za grijanje u odnosu na komoru za gašenje. Posjeduju nekoliko prednosti u odnosu na jednokomorne peći: brže ugrijavanje na željenu temperaturu, manja potrošnja energije, veći izbor tehnika gašenja te jednostavnije održavanje. S obzirom na broj komora najčešće se radi o dvokomornim ili trokomornim pećima. Maksimalna radna temperatura kod horizontalne dvokomorne vakuumske peći ovisi o vrsti upotrebljivanih grijača. Grafitni grijači podržavaju temperature do  $1320^{\circ}\text{C}$ , dok se molibdenskim grijačima može postići temperatura od  $1600^{\circ}\text{C}$ . Volumen radne komore kreće se od 25L do 700L, a obrađuju se šarže mase od 60-1000kg. Horizontalna trokomorna vakuumska peć se sastoji od: integrirane predkomore, komore s visokim temperaturama i komore za ohlađivanje. Uloga predkomore je dodatno osiguravanje šarže od pojave propusnosti, većeg stupnja automatizacije i povećanja proizvodnosti (Faltis, 2011.). Na slici 24 prikazane su dvokomorne vakuumske peći.



Slika 24. Shematski prikaz horizontalne dvokomorne vakuumske peći

(Izvor: [http://repozitorij.fsb.hr/1189/1/03\\_02\\_2011\\_ZAVRSNI\\_RAD.pdf](http://repozitorij.fsb.hr/1189/1/03_02_2011_ZAVRSNI_RAD.pdf))

## 3. Vertikalne jamske peći

Jamske peći namijenjene su za obradu predmeta većeg obujma nego što je to slučaj kod horizontalnih peći. Još jedan od razloga njihove upotrebe jest i taj što postoji mogućnost da

prilikom toplinske obrade izduženih predmeta lako može doći do progiba uzrokovanog plinom, a ove peći pružaju najbolje uvjete kako se to ne bi dogodilo. Korisni volumen komore iznosi od 250 do 3800 l, a obrađuju se šarže mase od 450 do 5000 kg. Tlak plina za ohlađivanje rijetko prelazi 20 bar (Faltis, 2011.). Na slici 25 prikazana je prikazana je vertikalna jamska vakuumska peć.



Slika 25. Vertikalna jamska vakuumska peć

(Izvor: [http://repositorij.fsb.hr/1189/1/03\\_02\\_2011\\_ZAVRSNI\\_RAD.pdf](http://repositorij.fsb.hr/1189/1/03_02_2011_ZAVRSNI_RAD.pdf))

#### 4. Vertikalne peći sa spuštajućim dnom

Ovaj tip vakuumskih peći, prikazanih na slici 26 po svojim je karakteristikama vrlo sličan prethodnom tipu. Posebno je pogodan za obradu velikih dijelova, posebno za obradu lemljenih spojeva koji se sklapaju na licu mjesta. Ovu vrstu peći karakterizira elektromehanički pogon koji poput dizala podiže steznu napravu prema gore u grijaću komoru, što utječe na povišenje produktivnosti. Također je povećana i sigurnost operatera koji je daleko od zone toplinskog zračenja iz komore. Omogućen je nesmetan utovar i istovar šarži čime je skraćeno vrijeme potrebno za postavljanje i izmjenu obradaka. To utječe na veliko povećanje produktivnosti. Korisni volumen komore kreće se između širokog spektra vrijednosti od 550 do 11400 l, dok se masa obrađivanih šarži kreće između 600 i 4500 kg. Upotrebljavaju se nešto niži tlakovi plina za gašenje zbog same veličine komore, a kreću se između 5 i 10 bar (Faltis, 2011.)



Slika 26. Vertikalna vakuumska peć sa spuštajućim dnom

(Izvor: [http://repozitorij.fsb.hr/1189/1/03\\_02\\_2011\\_ZAVRSNI\\_RAD.pdf](http://repozitorij.fsb.hr/1189/1/03_02_2011_ZAVRSNI_RAD.pdf))

#### 4.5 Prednosti i nedostaci

Prednosti:

1. Predmet termički obrađen u vakuumskoj peći nije podložan procesu oksidacije zbog toga što je u komori za zagrijavanje vakuum i nema čestica koji bi stvarale štetne spojeve. U procesu zagrijavanja, na temperaturi obrade, dolazi do razgradnje postojećih oksida
2. Značajno manje deformacije i promjene mjera (iskrivljenja) u odnosu na ostale načine termičke obrade. To je posljedica odgovarajućeg šaržiranja i gašenja u struji stlačenog plina ili smjesi plinova
3. Mogućnost izvođenja više postupaka u jednom ciklusu
4. Najhumaniji radni uvjeti
5. Obrada bez otpadnih tvari i onečišćenja okoline (Faltis, 2011.)

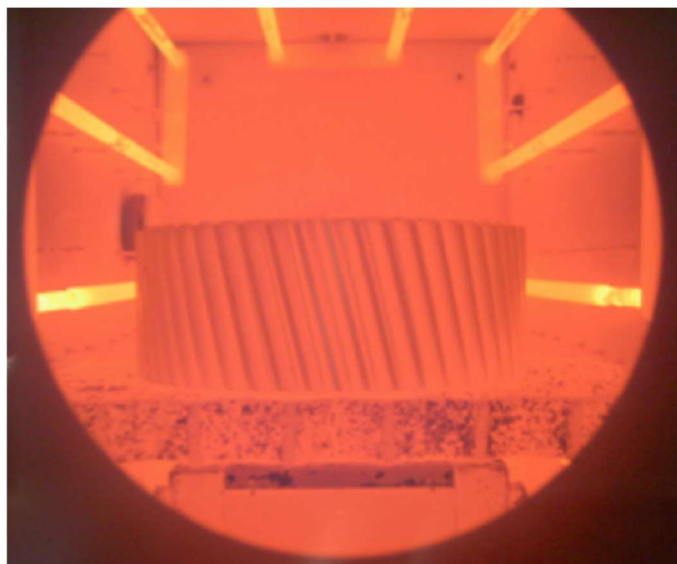
Najveći nedostatak vakuumske peći je njezina cijena. Vakuumska peć unutar komore za zagrijavanje mora ostvariti vakuum, stoga ona ima dodatne komponente kao što su

vakuumske pumpe, uređaji za mjerenje razine „vakuuma“, uređaji za detekciju propuštanja, različiti ventili, ventilatori i posebni sustavi za hlađenje. Komora za zagrijavanje mora biti hermetički zatvorena i ne smije biti propuštanja pa je izrada vakuumske peći vrlo zahtjevan proces. Posljedica je bolja kvaliteta termičke obrade, ali i znatno povećanje cijene u odnosu na druge peći za termičke obradu. (Faltis, 2011.)

## 5. TOPLINSKA OBRADA POLJOPRIVREDNIH DIJELOVA

### 5.1 Cementiranje osovina, vratila, zupčanika

Zupčanici se nakon izrade obrađuju toplinskom obradom. Toplinska obrada kod izrade zupčanika ima u cilju povećanje čvrstoće samih zupčanika. Također, cilj je postizanje bolje opteretivosti bokova i veća otpornost na trošenje izazvano trenjem. Kovani i valjani čelik ima često grubu strukturu, a radi nejednolikog hlađenja i različitu tvrdoću, pa je radi poboljšanja obradivosti potrebna odgovarajuća toplinska obrada. Čelici se izrađuju glodanjem, blanjanjem, lijevanjem, sinteriranjem i isjecanjem. Zbog toga se kod izrade zupčanika primjenjuju toplinske obrade čiji se utjecaj manje ili više ravnomjerno proteže na cijeli presjek ( normalizacija, meko žarenje, žarenje radi uklanjanja preostalih napetosti, žarenje radi postizanja kuglaste perlitne strukture, žarenje s reguliranim hlađenjem, poboljšavanje). Toplinske obrade čiji se utjecaj proteže samo na površinu zupčanika (površinske toplinske obrade: cementiranje, karbonitriranje, nitriranje u solnoj kupki ili plinu, sulfiriziranje, indukcijsko kaljenje, plameno kaljenje) (Dugonjić M., 2019.). Na slici 27 prikazano je cementiranje zupčanika.



Slika 27. Cementiranje zupčanika

(Izvor: <https://global-heat-treatment-network.com/kowalewski-global-heat-treatment-review/>)

Cementiranje najrasprostranjenija metoda otvrdnjavanja površine, je proces difuzije ugljika u površinu sa niskim sadržajem ugljika na povišenim temperaturama. To rezultira jezgrom sa visokim postotkom ugljika formiranog unutar površine. Tokom brzog hlađenja sa austenitne temperature, austenit se transformira u martenzit i površina sa visokim postotkom ugljika imat će veliku tvrdoću dok će jezgra sa manjim postotkom ugljika imati manju tvrdoću. Cilj procesa je stvoriti jak zupčanik, otporan na habanje zadržavajući u isto vrijeme mekšu, fleksibilnu jezgru. (R. Hlača, 2015.)

Glavni konstrukcijski materijali osovina i vratila jesu ugljični i legirani čelici. Čelik za te strojne elemente legira se s kromom, niklom, molibdenom i manganom. Već prema zahtjevima koje moraju zadovoljavati, osovine i vratila najprije se obrađuju tokarenjem, a njihovi osnaci poslije toga još brušenjem i eventualno poliranjem. Prema potrebi osovine i vratila obrađuju se (prije brušenja i poliranja) još i toplinsko-kemijskim postupcima (npr. kaljenjem, cementiranjem, nitriranjem). Pri tome materijal treba da bude odabran tako, da se osovini (vratilu) osigura potrebna dinamička čvrstoća i otpornost osnaca prema izlizavanju u ležajima. U posebnim slučajevima osovine i vratila mogu se napraviti od čeličnog lijeva ili od modificiranog lijevanog željeza, koje se odlikuje visokom čvrstoćom i bolje prigušuje vibracije nego čelični materijal ([https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elementi\\_strojeva\\_6\\_osevine\\_i\\_vratila.pdf](https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elementi_strojeva_6_osevine_i_vratila.pdf)). Na slici 28 prikazano je pužno vratilo pripremljeno za postupak cementiranja.



Slika 28. Pužno vratilo motokultivatora

(Izvor: <https://zir.nsk.hr/islandora/object/pfos%3A1805/datastream/PDF/view>)

Čelici za cementaciju predstavljaju konstrukcijske čelike kojima se nakon obrade odvajanjem čestica pougljičava rubni sloj. Nakon pougljičavanja rubnog sloja, kaljenjem se postiže visoka otpornost na trošenje rubnih slojeva, te povišena žilavost ne pougljičene jezgre. Čelici za cementaciju uglavnom sadrže 0,1-0,2% ugljika prije pougljičavanja, a mogu

biti ili nelegirani ili niskolegirani. Rubni sloj nakon procesa pougljeničenja sadrži 0,8-0,9% ugljika, te se zakaljivanjem postiže tvrdoća 61- 64 HRC. Nakon cementacije pougljičena jezgra ostaje feritno-perlitna ukoliko proizvod nije prokaljen. U slučaju prokaljivanja nastaje niskougljični martenzit. Obje navedene mikrostrukture karakterizira visoka udarna radnja loma pa je konačni proizvod otporan na trošenje s visokom žilavosti. Nakon cementacije površinski slojevi sadrže visokougljični martenzit (<https://zpreview.ir.nsk.hr/islandora/object/ffri:833/>).

## 5.2 Kaljenje dijelova poljoprivredne tehnike

Tribološko ponašanje dijelova poljoprivredne tehnike vezano je za „odnošenje“ materijala sa radnih tijela uz pomoć abrazivnih tvrdih čestica koje se nalaze u tlu. Na ovaj način radna tijela poljoprivrednih strojeva se troše i mijenjaju svoj oblik i dimenzije, odnosno oštrice radnih tijela se zatupljuju. Promjenom oblika radnih tijela dolazi i do njihovog nepravilnog rada jer su radna tijela konstruirana da se otpori u tlu smanje na najmanju moguću mjeru. Svi prethodno navedeni čimbenici dovode do neispravnosti radnih tijela koje ima za posljedicu financijske troškove i vrijeme zamjene dotrajalih radnih tijela.

Budući je trošenje u izravnoj mjeri sa površinskom tvrdoćom radnih tijela poljoprivredne mehanizacije, nakon izrade dijelova od čelika koji u svom proizvodnom stanju nemaju dovoljnu tvrdoću, pristupa se postupku kaljenja dijelova radnih tijela sa ciljem povećanja površinske tvrdoće.

Postupku kaljenja se najčešće podvrgavaju dijelovi poljoprivredne tehnike koji su tijekom svoga rada izravnom kontaktu sa tlom, na primjer: raonici plugova , motičice kultivatora, radna tijela podrivača i grubera, itd. Na slikama 29 i 30 prikazani su dijelovi poljoprivredne tehnike koji se najčešće podvrgavaju postupku kaljenja.



Slika 29. Raonik za plug

(Izvor: <http://www.jusel.com/proizvodjaci.php?id=338>)



Slika 30. Motičica kultivatora

(Izvor: <https://poljotehna-polic.com/kategorija/kultivatori>)



## 6. ZAKLJUČAK

U ovom radu specifičnim su dijagramima prikazane i objašnjene vrste toplinski obrada te njihova primjena na pojedinim dijelovima poljoprivredne tehnike. Toplinska obrada ima za cilj povećanje mehaničkih svojstava materijala, povećanje žilavosti, povećanje duktilnosti i mogućnosti preoblikovanja, smanjenje unutrašnjih naprezanja i pripremu materijala za rezanje. Toplinskom obradom najviše se obrađuju čelici. Krajnji cilj toplinske obrade je mijenjanje postojeće mikrostrukture te stvaranja nove, čime osiguravamo željena svojstva obrađivanog materijala odnosno svrha je dobiti svojstva koja će odgovarati primjeni. Osnovni parametri toplinske obrade su temperatura i vrijeme. Samo preciznom kontrolom navedenih parametara moguće je stvoriti visokokvalitetne dijelove i komponente sa željenim svojstvima. U tome nam pomaže automatizirana oprema koja omogućava precizno praćenje i vođenje temperature putem računala. Zaključuje se da je toplinska obrada metala važan dio tijekom procesa serijske proizvodnje dijelova i komponenti. Nakon ovog postupka materijali dobivaju potrebne karakteristike. Toplinska se obrada koristila dulje vrijeme, ali je bila nesavršena. Suvremene metode omogućuju postizanje boljih rezultata s nižim troškovima rada.

## 7. LITERATURA

1. Augusta D. (2011.): Dupleks postupak aluminiziranja i nitriranja čelika. Završni rad, Sveučilište u Zagrebu. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb. (12.05.2020.)
2. ASM Handbook Volume 4, Heat Treating, ASM International, 1991. (12.05.2020.)
3. ASM Handbook Volume 5, Surface Engineering, ASM International, 1994. (12.05.2020.)
4. Čevra A., Toplinska obrada metala: kemijsko mehanička tehnologija, vlast. nakl. Zagreb, 1980. god.
5. Dugonjić M. (2019.): Konstrukcijske izvedbe i slikovni prikaz reduktora primjenom CAD-alata. Završni rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku. Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek, Osijek. (15.05.2020.)
6. Faltis K. (2011.): Završni rad, Sveučilište u Zagrebu. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb. (30.04.2020.)
7. Hlača R. (2015.): Ispitivanje mikrostrukture bregaste osovine. Završni rad, Politehnika Pula. Visoka tehničko-poslovna škola s pravom javnosti, Pula. (07.05.2020.)
8. Horgas V. (2016.): Termodifuzijski postupak boriranja čelika. Završni rad, Sveučilište u Zagrebu. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb. (28.04.2020.)
9. Jalušić B. (2009.): Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb (03.05.2020.)
10. Klobučar P. (2018.): Utjecaj vrste nitriranja na abrazijsko trošenje. Završni rad, Sveučilište u Karlovcu. Strojarski odjel, Specijalistički studij strojarstva, Karlovac. (08.05.2020.)
11. Kolarić K. (2018.): Indukcijsko kaljenje vodilica gornjeg vreteništa i stupa. Završni rad, Sveučilište sjever. Odjel za proizvodno strojarstvo, Varaždin. (05.05.2020.)
12. Matković T., Matković P.; „Fizikalna metalurgija I“, [www.simet.unizg.hr](http://www.simet.unizg.hr) , 2011. (08.05.2020.)
13. Novak S. (2018.): Primjena vakuumske pirolize u obradi otpada. Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu. Geotehnički fakultet, Zagreb. (15.05.2020.)

14. Šalov B. (2019.): Tehnologija izrade pužnog vratila motokultivatora. Završni rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku. Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek, Osijek. (26.04.2020.)
15. Tadić I. (2012.): Dupleks postupak aluminiziranja i nitriranja čelika. Diplomski rad. Sveučilište u Zagrebu. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb. (08.05.2020.)
16. [http://www.ss-tehnicka-ri.skole.hr/dokumenti?dm\\_document\\_id=407&dm\\_dnl=1](http://www.ss-tehnicka-ri.skole.hr/dokumenti?dm_document_id=407&dm_dnl=1) (25.04.2020.)
17. [https://www.oss.unist.hr/sites/default/files/file\\_attach/Materijali%20II%20-%20Igor%20Gabri%C4%87%2C%20Slaven%20%C5%A0iti%C4%87.pdf](https://www.oss.unist.hr/sites/default/files/file_attach/Materijali%20II%20-%20Igor%20Gabri%C4%87%2C%20Slaven%20%C5%A0iti%C4%87.pdf) (25.04.2020.)
18. [https://loomen.carnet.hr/pluginfile.php/382716/mod\\_resource/content/1/Obrada%20materijala%20II%20-%20II%20dio.pdf](https://loomen.carnet.hr/pluginfile.php/382716/mod_resource/content/1/Obrada%20materijala%20II%20-%20II%20dio.pdf) (25.04.2020.)
19. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/heat-treatment> (26.04.2020.)
20. [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1329396769-0-prezentacija\\_mat\\_ii\\_to\\_pdf\\_bez\\_teksta.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1329396769-0-prezentacija_mat_ii_to_pdf_bez_teksta.pdf) (03.05.2020.)
21. <https://repozitorij.politehnikapula.hr/islandora/object/politehnikapu%3A8/datastream/PDF/view> (05.05.2020.)
22. [https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elementi\\_strojeva\\_6\\_osovine\\_i\\_vratila.pdf](https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elementi_strojeva_6_osovine_i_vratila.pdf) (20.05.2020.)
23. [https://z\\_preview.ir.nsk.hr/islandora/object/ffri:833/](https://z_preview.ir.nsk.hr/islandora/object/ffri:833/) (13.05.2020.)
24. <https://global-heat-treatment-network.com/kowalewski-global-heat-treatment-review/> (24.8.2020)
25. <https://zir.nsk.hr/islandora/object/pfos%3A1805/datastream/PDF/view> (14.05.2020.)
26. <http://www.jusel.com/proizvodjaci.php?id=338> (24.08.2020.)
27. <https://poljotehna-polic.com/kategorija/kultivatori> (25.08.2020.)