

# Vakuumske peći za toplinsku obradu

---

**Faltis, Kristian**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2011**

*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:235:291759>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-06-27**

*Repository / Repozitorij:*

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



Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# ZAVRŠNI RAD

Kristian Faltis

Zagreb, 2011.

Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:  
prof. dr. sc. Franjo Cajner

Kristian Faltis

Zagreb, 2011

## **IZJAVA**

*Izjavljujem da sam završni rad izradio samostalno i da odgovaram za sve što je u njemu napisano.*

*Zahvaljujem voditelju rada prof. dr.sc. Franji Cajneru i asistentu mag.ing. Ivanu Kumiću na stručnoj pomoći pri izradi ovoga rada.*

*Kristian Faltis*

## SADRŽAJ

|  |     |
|--|-----|
| <b>Sažetak</b> .....   | I   |
| POPIS SLIKA.....   | II  |
| POPIS TABLICA.....   | III |
| <b>1. Uvod</b> .....   | 1   |
| <b>2. Toplinska obrada u vakuumskim pećima</b> .....               | 2   |
| 2.1. Karakteristike vakuuma.....                                   | 2   |
| 2.2. Zagrijavanje.....   | 9   |
| 2.3. Hlađenje.....   | 12  |
| <b>3. Postupci toplinske obrade u vakuumskim pećima</b> .....      | 20  |
| 3.1. Kaljenje u vakuumskim pećima.....                             | 20  |
| 3.2. Žarenja u vakuumskoj peći.....                                | 23  |
| 3.3. Lemljenje u vakuumskoj peći.....                              | 25  |
| 3.4. Sinteriranje u vakuumskoj peći.....                           | 26  |
| 3.5. Cementiranje u vakuumskoj peći.....                           | 27  |
| 3.6. Nitiranje u vakuumskoj peći.....                              | 28  |
| <b>4. Prednosti i nedostaci vakuumskih peći</b> .....              | 30  |
| <b>5. Tipovi vakuumskih peći</b> .....                             | 32  |
| 5.1. Horizontalne jednokomorne vakuumske peći.....                 | 33  |
| 5.1.1. Opis horizontalne jednokomorne peći.....                    | 34  |
| 5.2. Horizontalne višekomorne peći (peći s hladnom komorom).....   | 36  |
| 5.2.1. Opis horizontalne višekomorne peći.....                     | 36  |
| 5.3. Vertikalne jamske peći.....                                   | 40  |
| 5.3.1. Opis vertikalne jamske peći za obradu velikih dijelova..... | 42  |
| 5.4. Vertikalne peći sa spuštajućim dnom.....                      | 44  |
| <b>6. Zaključak</b> .....  | 46  |
| <b>7. Literatura</b> .....   | 47  |

## Sažetak

Postupak toplinske obrade utječe na značajke i cijenu proizvoda podvrgnutog toplinskoj obradi. Stoga je važno na koji način i pod kojim uvjetima konkretni proizvod ugrijavamo, držimo na temperaturi toplinske obrade i hladimo.

U ovome radu proučavan je postupak toplinske obrade u vakuumskim pećima. Vakuumska peć je tip peći koja može zagrijavati materijale, najčešće metale, na vrlo visoke temperature i provoditi različite toplinske režime sa velikom stabilnošću i malim brojem onečišćenja. Kod tih peći obradci su unutra peći zaštićeni vakuumom. Odsutstvom zraka sprječava se prijenos topline konvekcijom, ali se i uklanjaju svi mogući elementi koji unose onečišćenje. Zagrijavanje metala na visoke temperature uglavnom uzrokuje brzu oksidaciju, što je nepoželjno. Vakuumska peć izvlači zrak iz komore za ugrijavanje što sprječava pojavu oksidacije, razugljičenja.

Inertni plin, kao što je argon, vodik, helij ili dušik, uglavnom se koristi za ohlađivanje metalnih obradaka. Plin s nadpritiskom nekoliko puta većim od atmosferskog, cirkulira oko obradka odvođeci toplinu prije nego što prođe kroz izmjenjivač topline i preda toplinu. Proces se ponavlja dok se ne postigne odgovarajuća temperatura.

Različiti postupci toplinske obrade mogu se izvoditi u vakuumskim pećima, kao što su: kaljenje, žarenje, žarenje legura koje otvrdnjavaju precipitacijom, popuštanje, otplinjavanje, tvrdo i visokotemperaturno lemljenje, sinteriranje, nitriranje u plazmi, pougljičavanje u plazmi...

Vakuumske peći imaju mnogo prednosti i zato su u današnje vrijeme neizostavna oprema u modernoj toplinskoj obradi. Uzrokuju značajno manje deformacije i promjene mjera, imaju najpogodnije uvjete za automatsko vođenje cijelog procesa, najhumaniji radni uvjeti za poslužitelja peći, nemaju otpadnih tvari, metali zadržavaju metalni sjaj i ne oksidiraju, nije potrebno naknadno čišćenje, nema razugljičenja površinskog sloja...

## POPIS SLIKA

|   |    |
|---|----|
| Slika 1. Shema mehaničke rotacijske pumpe [14].....   | 3  |
| Slika 2. Shema difuzijske pumpe [14].....   | 4  |
| Slika 3. Prikaz turbomolekularne pumpe [14].....  | 5  |
| Slika 4. Uređaj za detekciju curenja VS Series [7].....   | 6  |
| Slika 5. Parcijalni tlakovi para metala ovisni o temperaturi [5].....   | 7  |
| Slika 6. Usisne karakteristike vakuumskih pumpi [7].....  | 8  |
| Slika 7. Usporedba krivulja ugrijavanja šarže u vakuumu (“vacuum heating”) u odnosu na konvekcijsko ugrijavanje (“convective heating) dodavanje dušika u vakuumsku komoru. [5]..... | 9  |
| Slika 8. Komora za ugrijavanje [5].....   | 10 |
| Slika 9. Komora za ugrijavanje sa šaržom [5].....   | 10 |
| Slika 10. Prikaz komore za ugrijavanje sa grijačim elementima [12].....   | 11 |
| Slika 11. Prikaz dobro očuvanje komore za ugrijavanje sa grafitnim elementima nakon 5 godina korištenja za postupke lemljenja [9].....  | 11 |
| Slika 12. Utjecaj porasta tlaka na koeficijent konektivnog prijenosa topline ( $W/(m^2K)$ ) [6].....  | 13 |
| Slika 13. Obodno-radijalno strujanje plina [5].....   | 14 |
| Slika 14. Cikličko promjenjivo strujanje plina [5].....   | 15 |
| Slika 15. Ohlađivanje horizontalno oscilirajućim strujanjem plina [5].....  | 15 |
| Slika 16. Ohlađivanje cikličkim promjenjivim obodno-radijalnim strujanjem plin [5].....   | 16 |
| Slika 17. Dvokomorna vakuumska peć DualTherm® [9].....  | 17 |
| Slika 18. Tehnološki dijagram postupka kaljenja [5].....  | 21 |
| Slika 19. Prikaz TTT-dijagrama za podeutektoidne čelike [5].....  | 22 |
| Slika 20. Postupak kaljenje u vakuumskoj peći [5].....  | 23 |
| Slika 21. Vakuumska peć za postupke žarenja tvrtke B.M.I [15].....  | 24 |
| Slika 22. Vakuumska peć za postupke lemljenja tvrtke Ipsen (Titan Type-6) [1].....  | 25 |
| Slika 23. Presjek dijela zupčanika s označenim iznosima tvrdoće na pojedinim mjestima. [5].....   | 28 |
| Slika 24. Predmeti obrađeni u vakuumskoj peći imaju metalni sjaj [5].....   | 30 |
| Slika 25. Kontrolni sustav za upravljanje sa udaljenog računala [12].....   | 31 |
| Slika 26. SECO/WARWICK horizontalna jednokomorna vakuumska peć [9].....   | 34 |
| Slika 27. Shematski prikaz horizontalne dvokomorne vakuumske peći [9].....  | 38 |
| Slika 28. Horizontalna dvokomorna vakuumska peć [9].....  | 40 |
| Slika 29. Vakuumska vertikalna jamska peć [16].....   | 41 |
| Slika 30. Shematski prikaz vertikalne jamske peći [16].....   | 41 |
| Slika 31. Prikaz 3D modela i gotove konstrukcije vertikalne jamske peći [16].....   | 43 |
| Slika 32. Grijači elementi u obliku cijevi [11].....  | 43 |
| Slika 33. Vertikalna vakuumska peć sa spuštajućim dnom [9].....   | 45 |

## POPIS TABLICA

|   |    |
|---|----|
| Tablica 1. Vrste vakuuma i njihova primjena u toplinskoj obradi vakuumskim pećima [5].....          | 2  |
| Tablica 2. Fizikalna svojstva plinova vodika, helija, dušika i argona [6].....                      | 12 |
| Tablica 3. Viskozitet i temperature uporabe tri tipa ulja za hlađenje u vakuumskim pećima [13]..... | 18 |
| Tablica 4. Faze gašenja u sredstvu podložnom Leidenfrostovom efektu [5].....                        | 19 |
| Tablica 5. Tehničke karakteristike SECO/WARWICK horizontalne jednokomorne peći [9].....             | 35 |



# 1. Uvod

Postupak toplinske obrade neizostavna je karika u lancu proizvodnje mnogih strojnih dijelova i alata. Njenim provođenjem uvelike se definiraju uporabna svojstva samog proizvoda. Zbog toga ju je jako važno znati korektno provesti. Za to je nužno poznavati principe, vrste, parametre toplinskih obrada, kao i imati adekvatnu opremu, s kojom pak valja znati upravljati i racionalno gospodariti.

Alati i veliki broj strojnih dijelova toplinski se obrađuju radi postizanja zahtijevanih svojstava (mehaničkih, triboloških, antikorozijskih i dr.). Toplinski obrađeni dijelovi i alati pojavljuju se u dimenzijama od  $10^{-6}$  do  $10^2$  m i u rasponu masa od miligrama do nekoliko tona. Ovakav raspon mjera i masa zahtjeva i specijaliziranu opremu (peći, kupke i posebne uređaje) za provođenje postupaka toplinske obrade dijelova velikih raspona masa i dimenzija.

Jedan od najmodernijih načina toplinske obrade jest onaj u vakuumu, koji se odvija u posebnim vakuumskim pećima u kojima je uobičajeni tlak oko 1 mbar.

Kao sredstvo za gašenje se koriste inertni plinovi (dušik, helij, argon, vodik...) koje unosimo u vakuumsku komoru s nadpritiskom.

Najveća prednost navedenih peći je površina koja nema uključaka i oksida nakon postupka toplinske obrade. Zbog malih promjena mjera i iskrivljenja najpogodnija je za obradu visokolegiranih čelika.

U ovome radu prvo je općenito pisano o toplinskoj obradi u vakuumskim pećima. Pisano je o načinu zagrijavanja i hlađenja, zaštitnim plinovima i načinu vođenja procesa. Zatim su nabrojani postupci toplinske obrade koji se mogu provesti u vakuumskim pećima. Na kraju je pisano o mogućim izvedbama vakuumskih peći i načinu na koji one rade.

## 2. Toplinska obrada u vakuumskim pećima

### 2.1. Karakteristike vakuuma

Kao što iz samog naslova možemo zaključiti ova vrsta toplinske obrade se provodi u visoko-specijaliziranim pećima u kojima pomoću različitih crpki postizemo vakuum. Svaka vakuumska peć može imati nekoliko vakuumskih crpki. 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. Vakuum služi kao zaštitna atmosfera u procesu toplinske obrade. Uklanjanjem zraka iz komore za toplinsku obradu omogućujemo obradu predmeta bez oksidacije površine i razgradnju postojećih oksida. Obratci ostaju metalno svijetli i nakon toplinske obradbe.

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 [5].

Tablica 1. Vrste vakuuma i njihova primjena u toplinskoj obradi vakuumskim pećima [5]

| Vrsta vakuuma  | p, mbar                 | Primjena kod toplinske obrade:  |
|----------------|-------------------------|---|
| Grubi vakuum   | 1000 ... 1              | - nelegirani čelici (kaljenje, cementiranje)                          |
| Srednji vakuum | 1 ... $10^{-3}$         | - legirani alatni čelici<br>- nehrđajući čelici (osim legiranih Ti)   |
| Fini vakuum    | $10^{-3}$ ... $10^{-6}$ | - nehrđajući čelici (legirani Ti)<br>- alati prevučeni CVD prevlakama |

Vakuumske su metode i mjerenja danas praktički nezaobilazni i u znanosti i u tehnici i tehnologiji. U mikrosvijetu praktički nema pokusa koji se može postići bez upotrebe vakuuma. No, proizvodi najnaprednijih tehnologija sve češće se stvaraju u vakuumskim uvjetima ili čak tokom njihovog dnevnog funkcioniranja moramo upotrebljavati vakuumske uvjete. Jasno je stoga da je moderni laboratorij teško zamisliti bez odgovarajućih vakuumskih

uređaja. Različite kvalitete vakuuma postizemo različitim uređajima ustrojenim prema različitim fizikalnim principima.

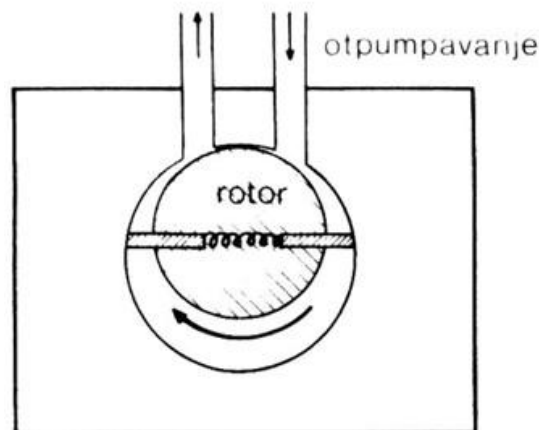
Uređaji za postizanje vakuuma su:

- Mehanička rotacijska pumpa
- Difuzijska pumpa
- Turbomolekularne pumpe
- Ionska pumpa
- Kriogenske pumpe
- Sublimacijske pumpe

Načelo rada mehaničke rotacijske pumpe vidi se na slici 1. U cilindričnu šupljinu ekscentrično se polaže valjak koji rotira oko osi paralelne cilindričnoj šupljini. Krilca tog rotora potisnuta su elastičnim perima do plašta cilindra, a dobro zaptivanje i podmazivanje krilaca osigurava se uljem. Očito se volumen plina u kontaktu s kanalom za otpumpavanje rotacijom najprije povećava, a zatim se kontakt s tim kanalom prekine i volumen izoliranog plina umanjuje i izbacuje u kanal za izbacivanje.

Ulje, vraćeno u pumpu posebnim kanalom, sadrži otopljenog zraka. Taj mehanizam, ali i tlak uljnih para, određuje fizikalnu granicu za pumpanje, tj. za postizanje vakuuma mehaničkom rotacijskom pumpom.

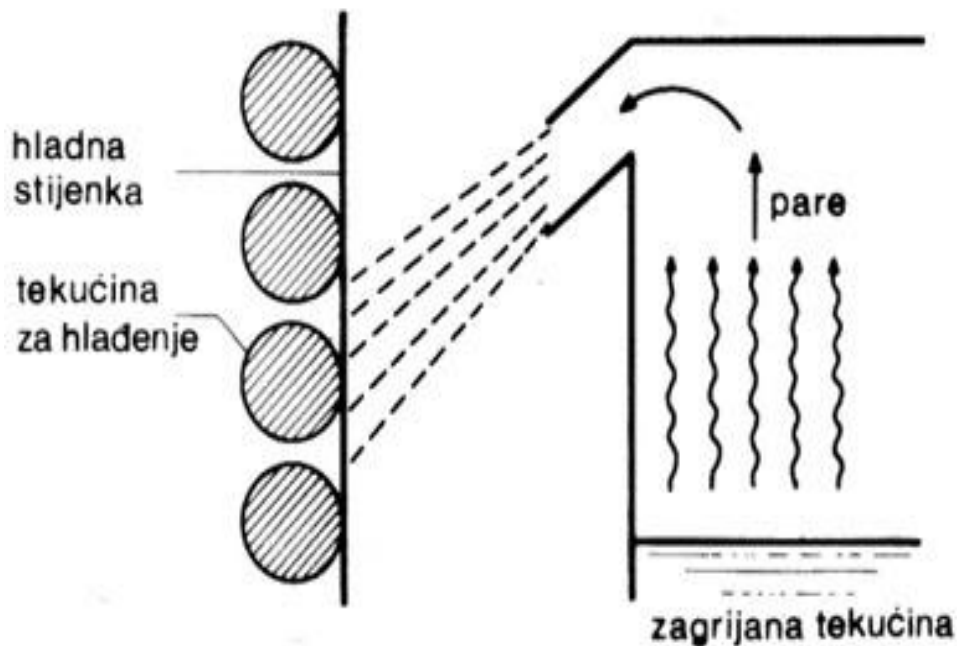
Krilca ekscentrično položenog rotora dobro prijanjaju uz stjenku. Volumen koji omeđuje krilce (gornja površina desnog krilca) najprije se rotacijom povećava. Zatim nadolazeće drugo krilce presijeca vezu promjenljivog volumena s okolinom. Potom počinje kompresija, a zatim i isisavanje plina [14].



Slika 1. Shema mehaničke rotacijske pumpe [14]

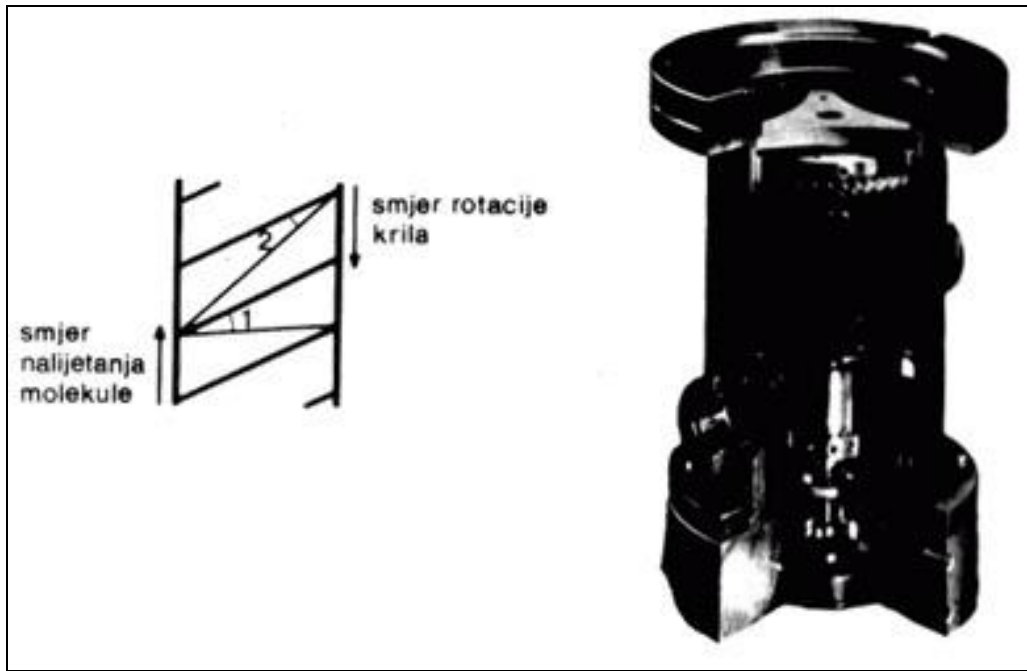
Kod difuzijske pumpe efekt isisavanja dobiva se kada mlaz živinih para ili para silikonskog ulja, formiran mlaznicama, sudarajući se predaje impulse molekulama u prostoru kojim mlaz prolazi (slika 2). Mlaz udara pod kutom u hladenu stijenku i na njoj se para znatno kondenzira.

Pare posebne tekućine za pumpanje ispuštaju se nakon isparavanja kroz posebno konstruirane mlaznice. To protjecanje pare velikim brzinama, zajedno s hladenom stijenkom, osigurava visoke vrijednosti vakuuma unutar radne komore [14].



Slika 2. Shema difuzijske pumpe [14]

Ključni su dio turbomolekularne pumpe metalna krilca razmještena po obodu kruga pod kutom u odnosu prema ravnini kruga (slika 3). Ona se vrte brzinom mnogo većom od brzine molekula. Zamislimo da sjedeći na obodu kruga vidimo sljedeću situaciju: Molekule nalijeću na krilce smjerom označenim posebnom strelicom i s jedne i s druge strane. Očito je kut slobodnog prolaska za prijelaz lijevo-desno veći od onog desno-lijevo. Stoga se formira razlika tlakova između različitih strana, a u samom toku se izbjegava zadržavanje ulja ili uljnih para. Iako je komercijalno skuplja upotrebljava se kada u sustavu nisu poželjne različite pare [14].



Slika 3. Prikaz turbomolekularne pumpe [14]

Kod ionske pumpe molekule plina se ioniziraju elektronima. Električnim poljem se ioni transportiraju. Ponekad se dodaje magnetsko polje kako bi se putanja ionizirajućih elektrona produžila spiralnim gibanjem u magnetskom polju (uz efekte ionizacije nastoje se molekule isisavanog plina „ukopati“ u stjenku) [14].

Sublimacijske pumpe upotrebljavaju se za dobivanje ultravisoke razine vakuuma. Najprije treba postići visok vakuum. Zatim titanski izvor zagrijan do temperature sublimacije deponira kemijski aktivan film na okolne površine. Film veže molekule plina. Time se postiže smanjenje tlaka. Upotrebom sublimacijskih pumpa tlak se može smanjiti za nekoliko redova veličine [14].

Kriogenske pumpe rade na principu hlađenja materijala do niskih temperatura jer se tako smanjuje tlak zasićenih para. Tako je omogućena kondenzacija pare na mnogo nižim tlakovima i, posljedično, efekt pumpanja. Također se i za nekondenzirane plinove hlađenjem reducira njihov tlak [14].

Vakuumske peći rade tako da kontroliraju vrijednosti tlaka unutar komore u kojoj se provodi toplinska obrada. Na taj način omogućuju da potrebne strukturne transformacija dostignu svoje odgovarajuće parametre.

Svaka vakuumska peć prije ili kasnije uslijed dugogodišnjeg rada ili neispravne konstrukcije razvije pojavu propuštanja. „Stupanj propusnosti peći“ je omjer porasta tlaka i vremena. To je veličina koja nam opisuje propusnost i ona mora biti manja od  $1 \cdot 10^{-3}$  mbar/s.

Svaki tip vakuumskih peći mora osigurati uvjete unutar komore kod kojih neće biti tako velike propusnosti koje uzrokuje povećanje tlaka, a s time i opasnost od oksidacije površine.

Propuštanje se može pojaviti na različitim mjestima. Najčešće se ono događa na vratima vakuumske peći ili na ventilima. Prilikom toplinske obrade u vakuumskoj peći, kada temperatura obrade raste, različiti metali se različito šire i na taj način uzrokuju propuštanje koje nije prisutno pri nižim temperaturama [7].

Velika propusnost će biti jako očita. U tom slučaju crpke za istiskivanje zraka neće raditi i obradak će pokazivati očite znakove oksidacije.

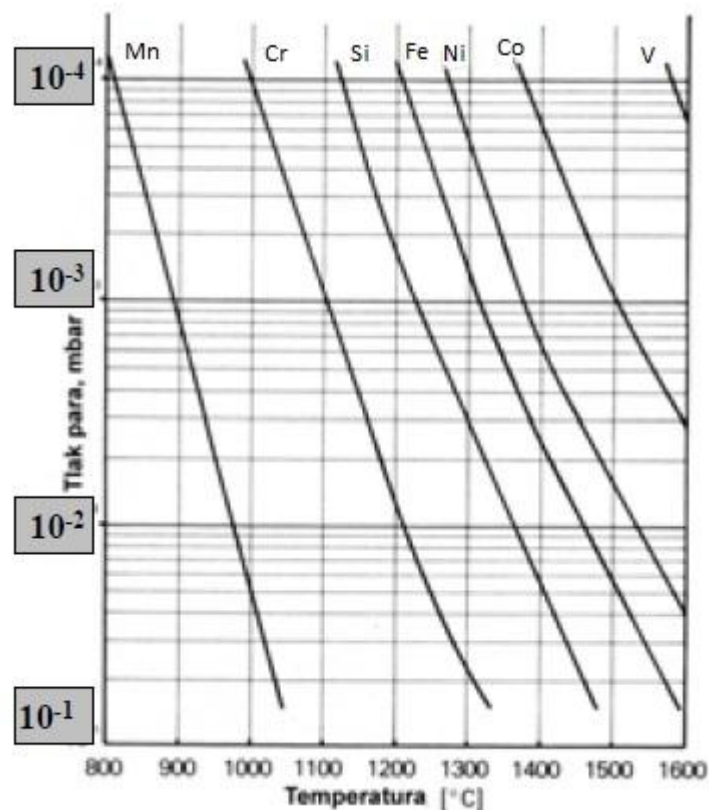
Mala propusnost može proći nezamijećeno. Crpke za istiskivanje zraka će raditi, ali obrađivani materijal, zbog propuštanja, može pokazati značajna oštećenja. Manometar može pokazivati nazivnu vrijednost vakuuma iako u stvarnosti to nije tako. Stoga se u suvremene vakuumske peći ugrađuju posebni uređaji za detekciju propuštanja [7]. Jedan takav uređaj prikazan je na slici 4.



Slika 4. Uređaj za detekciju curenja VS Series [7]

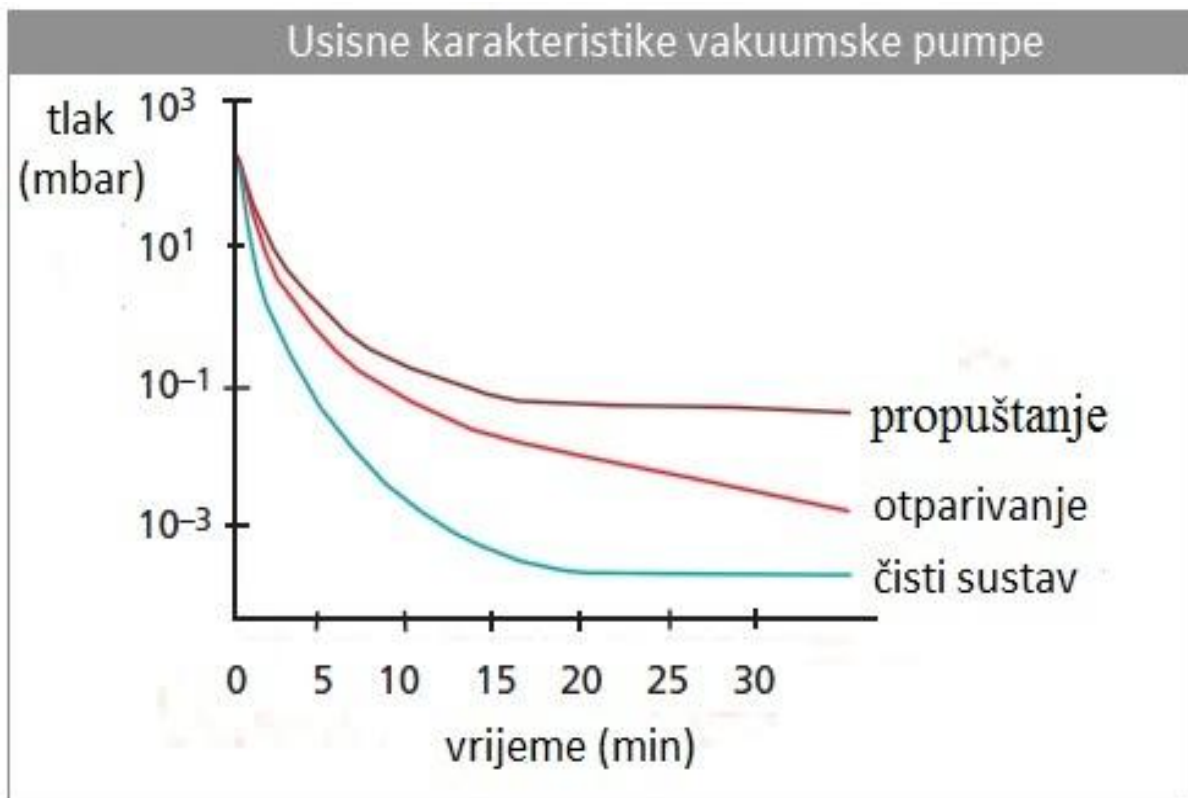
Osim propuštanja u procesu toplinske obrade može doći i do selektivnog otparivanja. To je proces koji uključuje sublimaciju ili isparavanje pojedinih elemenata (Mn,Cr,Si...) pri visokim temperaturama i niskim tlakovima. Selektivno otparivanja se pojavljuje već pri temperaturama većim od 950° C. Ono može uzrokovati povećanje tlaka što je kod vakuumskih peći nepoželjno. Parcijalni tlakovi pojedinih elemenata rastu. Selektivno otparivanje može biti smanjeno ako je obradak posebnim metodama obrađivan i pripremljen. Čišćenje površine ili individualna obrada svakog pojedinog dijela sklopa smanjuje selektivno otparivanje [17].

Na slici 5 prikazani su parcijalni tlakovi metala u ovisnosti o temperaturi. Snižanjem tlaka tj. povećanjem vakuuma na nižim temperaturama može doći do otparivanja pojedinih elemenata. Vidimo da će najveće selektivno otparivanje imati mangan (Mn) kod kojeg će parcijalni tlak pri 1000°C iznositi 0.05 mbar-a dok će pri istom temperaturi parcijalni tlak kroma (Cr) iznositi  $10^{-4}$  mbar-a. Odnosno, na slici 5 se može iščitati potreban podtlak na nekoj temperaturi obrade, potreban da bi neki od metalnih elemenata napustio obradak. Istom logikom uočavamo vrijednosti koje nije uputno dosegnuti, ukoliko želimo zadržati dotične elemente u obradku.



Slika 5. Parcijalni tlakovi para metala ovisni o temperaturi [5]

Na slici 6 prikazane su tri usisne karakteristike vakuumskih pumpi. Krivulja obojena smeđe prikazuje pad tlaka s vremenom kod vakuumskih peći pri pojavi propuštanja. Crvena krivulja pokazuje pad tlaka pri pojavi selektivnog otparivanja nekih od nabrojanih elemenata (Mn,Cr,Si...). Plava krivulja pokazuje sustav u kojem se ne bi javilo niti propuštanje niti selektivno otparivanje.



Slika 6. Usisne karakteristike vakuumskih pumpi [7]

Selektivno otparavanje ima nekoliko negativnih posljedica:

- ograničavaju najmanji iznos tlaka koji možemo postići u vakuumskoj peći
- produžuju vrijeme potrebno za postizanje visokog i ultravisokog vakuuma
- molekule koje isparavaju mogu predstavljati izvor nečistoća

Kako bi spriječili onečišćenje obradaka molekulama koje isparavaju u komoru za ugrijavanje se pomoću ventilatora ubacuje inertni plin (najčešće dušik) pri tlaku od 1 bar koji štiti obradke. Onečišćenja uzrokuju promjene u fizikalnim svojstvima i loše utječu na kvalitetu obradaka [9].

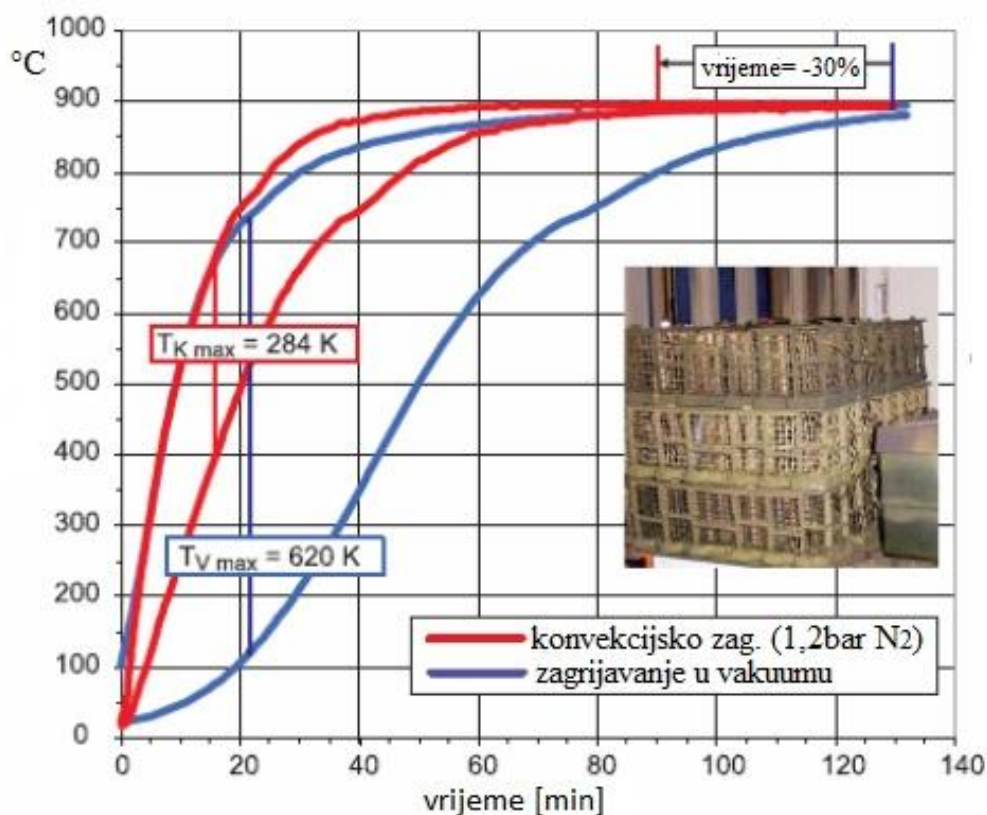


## 2.2. Zagrijavanje

Radne temperature koje postizemo u vakuumskim pećima prilikom ugrijavanja su od 1100°C do 1500°C. To je najčešće temperatura austenitizacije ili homogenizacije koje iznose oko 1200 (1350) °C. Možemo postići jednoliku temperaturu unutar komore za ugrijavanje sa vrlo malim odstupanjima od nazivnih vrijednosti.

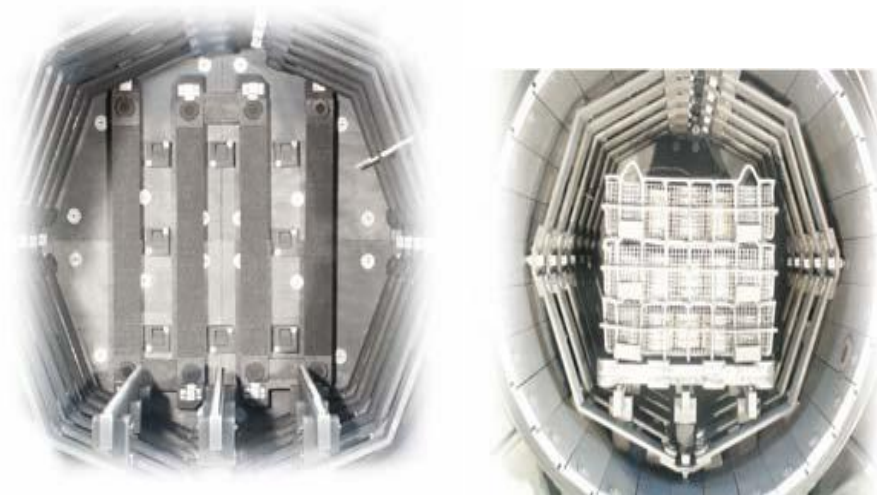
Zagrijavanje se vrši radijacijom (zračenjem). Isisavanjem zraka i ostalih plinova sriječava se zagrijavanje konvekcijom. Neke vakuumske peći imaju poseban ventilator za ubacivanje inertnih plinova. Najčešće je to dušik (N<sub>2</sub>) koji kruži oko šarže i omogućava kovekcijsko ugrijavanje. [9]

Na slici 7 napravljena je usporedba krivulja ugrijavanja šarže u vakuumu (“vacuum heating”) u odnosu na konvekcijsko ugrijavanje (“convective heating) dodavanje dušika u vakuumsku komoru. Prednosti ugrijavanja uz prisutstvo inertnog plina su izbjegavanje selektivnog otparivanja legirnih elemenata i ubrzavanje ugrijavanja šarže zbog toga što se ugrijavanja sada vrši i zračenje i konvekcijom.



Slika 7. Usporedba krivulja ugrijavanja šarže u vakuumu (“vacuum heating”) u odnosu na konvekcijsko ugrijavanje (“convective heating) dodavanje dušika u vakuumsku komoru. [5]

Pravilan izbor materijala i pravilna izrada komore za ugrijavanje (slika 8 i slika 9) su ključni u ostvarivanju jednolične temperature po čitavom volumenu komore. Fizikalna svojstva konstrukcije za ugrijavanje i njezinih elemenata koji vrše ugrijavanje i obavijaju šaržu utječu na mnoga svojstva ugrijavanja unutar vakuumskih peći [3].



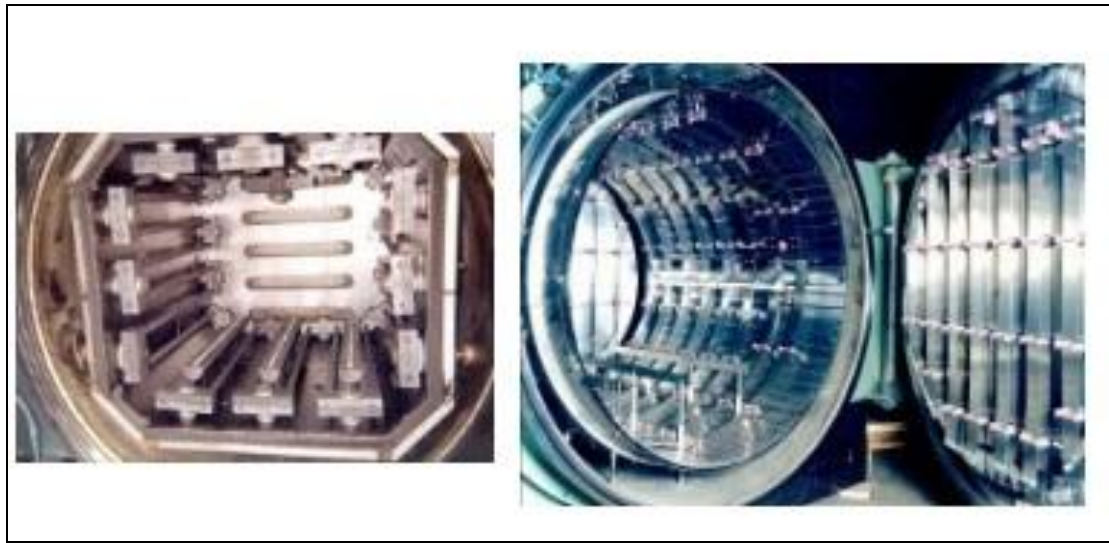
Slika 8. Komora za ugrijavanje [5]      Slika 9. Komora za ugrijavanje sa šaržom [5]

Konstrukcija za ugrijavanje 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. Vlaknasta konstrukcija, koja najčešće sadrži grafitna ili keramička vlakna, je veoma isplativa zbog manje cijene, dužeg životnog vijeka i velike otpornosti na toplinske šokove. Konstrukcija izrađena od metala i vlakna predstavlja srednju razinu cijene i rada [9].

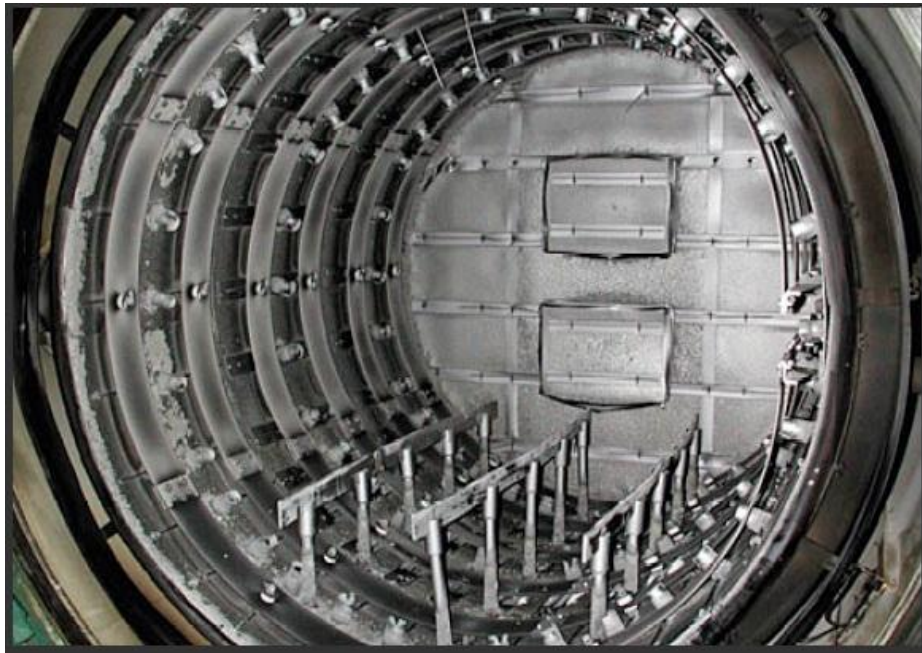
Elementi (grijači) koji se koriste za ugrijavanje najčešće su metalni ili grafitni. Na slici 10 prikazani su metalni elementi u obliku traka načinjeni od molibdena (desno) i grafitni grijači elementi u obliku šipki (lijevo).

Metalni elementi (Mo, Ta, MoLa, W, NiCr, FeCrAl) su izrađeni u obliku uskih ili širokih traka ili metalnih šipki. Metalni elementi legirani niklom i željezom imaju odličnu otpornost na oksidaciju. Koriste se za postizanje temperatura od oko 1150°C. Elementi izrađeni od molibdena koriste se pri temperaturama do oko 1315°C, a postoje i elementi izrađeni od molibdena koji imaju primjenu do 1650°C [9]



Slika 10. Prikaz komore za ugrijavanje sa grijačim elementima [12]

Grafitni elementi su proizvedeni u obliku šipki, cijevi, ploča i traka, a mogu biti i kružnog oblika. Grafit je veoma lagan, otporan na toplinske šokove, otporan na agresivne medije i toplinski jako stabilan. Elementi za ugrijavanje izrađeni od grafita imaju dugi vijek trajanja (slika 11) i ekonomski su veoma isplativi. Imaju malu masu i lagani su za održavanje i mijenjanje [9].



Slika 11. Prikaz dobro očuvanje komore za ugrijavanje sa grafitnim elementima nakon 5 godina korištenja za postupke lemljenja [9]

Temperatura se unutra komore za zagrijavanje mjeri pomoću temperaturnih senzora, termoparova. Oni daju preciznu informaciju o temperaturi unutar komore što omogućuje točno mjerenje vremena ugrijavanja i držanja na temperaturi toplinske obrade. Podaci o temperaturi se mogu učitavati u računalo što obradu čini visoko automatiziranom i programabilnom [1].

### 2.3. Hlađenje

Hlađenje u vakuumskim pećima se provodi pomoću struje stlačenog plina, ali postoje i izvedbe s posebnim komorama za ohlađivanje u ulju. Hlađenje se ostvaruje strujanjem plina oko obradka. Brzina hlađenja je veća od hlađenja na mirnom zraku, ali sporija od hlađenja u ulju. Postoji tipovi vakuumskih peći koji imaju posebnu komoru u kojoj se odvija hlađenje što dodatno ubrzava proces hlađenja.

Najčešće korišteni plinovi za ohlađivanje su argon, dušik, helij i u nekim slučajevima vodik. Fizikalne karakteristike nabrojanih plinova dane su u tablici 2.

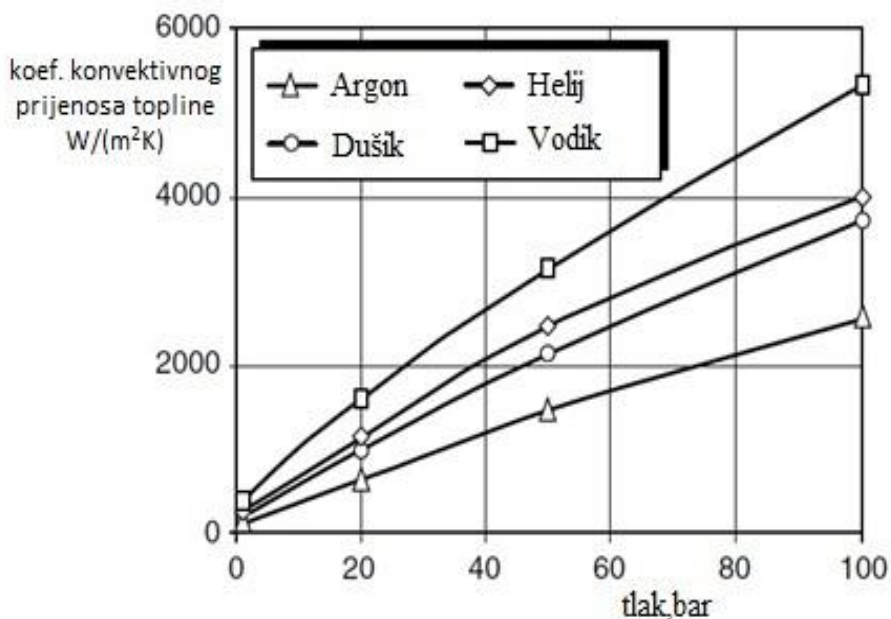
Tablica 2. Fizikalna svojstva plinova vodika, helija, dušika i argona [6]

| Tablica 2.<br>Fizikalna svojstva plinova vodika, helija, dušika i argona |       |        |       |       |
|--|-------|--------|-------|-------|
| svojstva   | vodik | helij  | dušik | argon |
| gustoća (kg/m <sup>3</sup> )   | 0.303 | -0.601 | 4.207 | 6.008 |
| spec. toplina (J/(kgK))  | 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  |

Toplinska vodljivost, specifična toplina, gustoća i dinamički viskozitet utječu na koeficijent konvektivnog prijenosa topline ( $\alpha$ ).

Prema tablici 2. najveću vrijednost koeficijenta konvektivnog prijenosa topline ima vodik (najveći i u usporedbi sa svim drugim kemijskim elementima i spojevima), iza njega slijedi helij, pa dušik i na kraju argon. Na slici 8. prikazano je kako tlak (nadpritisak) utječe na porast

koeficijenta konvektivnog prijenosa topline kod plinova koji se koriste u vakuumskim pećima [6]. Iz slike 12 vidimo da pri porastu nadpritiska značajno povisujemo koeficijent konvektivnog prijenosa topline. Npr. helij će pri nadpritisku od oko 40 bar-a imati  $\alpha$  jednak  $2000 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  dok će povišenjem nadpritiska na 100 bar-a njegov  $\alpha$  iznositi  $4000 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .



Slika 12. Utjecaj porasta tlaka na koeficijent konvektivnog prijenosa topline ( $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ) [6]

Vodik je eksplozivan i pokazuje svojstva razugljenja iznad  $1000^\circ\text{C}$  ( $1832^\circ\text{F}$ ). Helij je relativno skup i stoga se koristi isključivo sa sustavom za reciklažu i mogućnošću ponovnog korištenja. Argon pokazuje relativno nisku brzinu ohlađivanja dok je dušik taj koji se u današnje vrijeme najviše koristi u vakuumskim pećima. Dušik i argon su plinovi koji se koriste do najviše  $10^6 \text{ Pa}$  (10 bar) zbog njihove velike otpornosti na protjecanje koja je posljedice velika gustoće i dinamičke viskoznosti [6]. Oni se koriste sa nadpritiskom od 1 bar za hlađenje visokolegiranih čelika zakaljivih na zraku. Kada ih koristimo sa nadpritiskom od 6 bar-a koristimo ih za hlađenje čelika legiranih kromom, brzoreznih čelika i čelika za hladni i topli rad od srednjih do velikih dimenzija. Vodik i helij koristimo sa nadpritiskom od oko 20 bara i pritom ohlađujemo niskolegirane čelike i čelike za cementiranje malih i srednjih dimenzija [6].

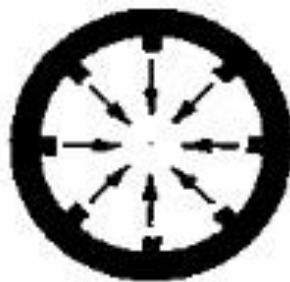
Utjecajni čimbenici na intenzivnost hlađenja u plinu su:

- Vrsta plina (fizikalna svojstva)
- Brzina strujanja
- Tlak plina (slika 12)
- Vrsta strujanja (laminarno/ turbulentno)
- Kut nastrujavanja

Kako je faza hlađenja nužna pri toplinskoj obradi predmeta, a hlađenje u plinu razmjerno je sporo upravo se raznim konstrukcijama sustava za hlađenje omogućiti dovoljno brzo hlađenje sa što jednoličnijim i manjim deformacijama. Zato danas postoji 5 osnovnih tipova suvremenih sustava za ohlađivanje u plinu [5]:

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. Na slici 13 shematski je prikaz obodno-radijalnog strujanja plina.

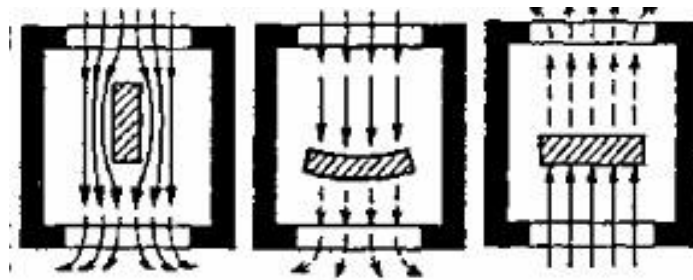


Slika 13. Obodno-radijalno strujanje plina [5]

2. Ohlađivanje ciklički promjenjivim strujanjem plina odozgo-odozdo ili horizontalno (lijevo-desno)

Ovim sustavom za hlađenje svakih 10 do 15 sekundi mijenjamo smjer strujanja plina pod tlakom. Plin može strujati u vertikalnom smjeru tako da promjenjivo nastrujava na obradak odozgo pa odozdo ili može strujati u horizontalnom smjeru

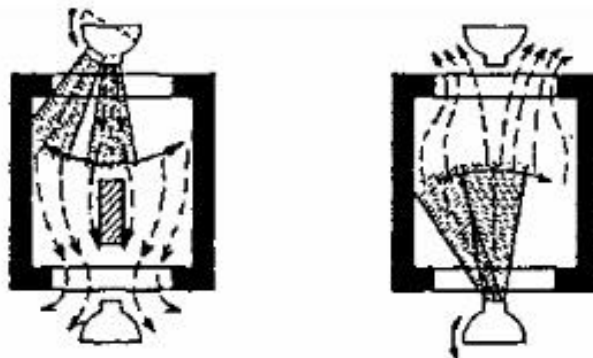
mijenjajući smjer sa lijeva na desno i s desna na lijevo. Ovim se izbjegavaju deformacije kod ležećih vitkih obradaka koje bi nastale intenzivnim ohlađivanjem samo s jedne, npr. gornje strane. Na slici 14 shematski je prikaz cikličkog promjenjivog strujanja plina.



Slika 14. Cikličko promjenjivo strujanje plina [5]

### 3. Ohlađivanje horizontalno oscilirajućim strujanjem plina

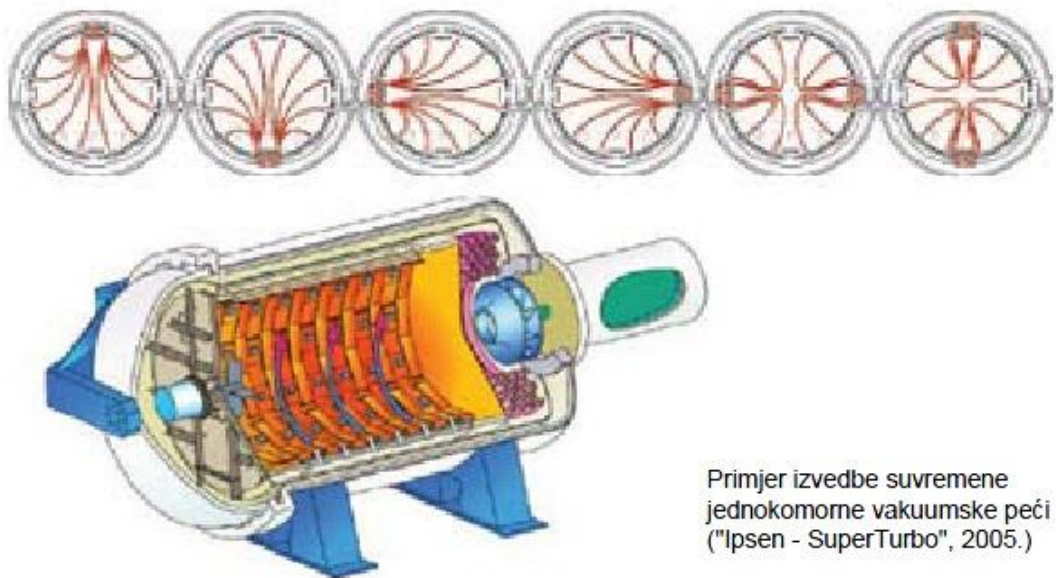
Ovaj način ohlađivanja je sličan prethodnome ( promjene strujanja u vertikalnom smjeru), ali je razlika u tome što kod ohlađivanja horizontalno oscilirajućim strujanjem plina imamo dodatnu oscilaciju u horizontalnom smjera kao što pokazuje slika 15 (tzv. “dualdinamičko” plinsko ohlađivanje). Ovim se postiže izvrsno jednolično i vrlo intenzivno ohlađivanje.



Slika 15. Ohlađivanje horizontalno oscilirajućim strujanjem plina [5]

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

Slika 16 prikazuje smjerove strujanja kod promjenjivog obodno-radijalnog strujanja i primjer izvedbe suvremene jednokomorne vakuumske peći od tvrtke „Ipsen“.



Slika 16. Ohlađivanje cikličkim promjenjivim obodno-radijalnim strujanjem plin [5]

#### 5. Ohlađivanje u hladnoj komori

Postoje mnoge prednosti ohlađivanja obradaka u posebnoj hladnoj komori u odnosu na vakuumske peći bez komora za hlađenje.

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 ohlađivanja. Još jedan otežavajući faktor je da se dijelovi malog presjeka ohlade brže nego zidovi peći pa zračenje zidova na njih smanjuje efekt ohlađivanja. Posljednji otežavajući faktor je vezan za energiju motor-ventilatora (turbine od više desetaka kW) koja se velikim dijelom pretvara u toplinu koju treba odvesti. [5]



Na slici 17 prikazana je vakuumska peć DualTherm<sup>®</sup> tvrtke ALD koja ima dvije komore. Jednu za u grijavanje šarže, a drugu za ohlađivanje. Ovaj tip peći se koristi za niskotlačno pougljičavanje i visokotlačno gašenje stlačenim plinom. Neke prednosti ohlađivanja u hladnoj komori biti će navedene u daljnjem tekstu.



Slika 17. Dvokomorna vakuumska peć DualTherm<sup>®</sup> [9]

Prednosti ohlađivanja u hladnoj komori [9]:

- Ohlađuje se samo šarža, a komora peći ostaje na istoj temperaturi. Time se smanjuje zagrijavanje rashladnog plina.
- Zidovi hladne komore su prislonjeni tijesno uz šaržu, tako da nema slobodnog prostora oko šarže, i sav rashladni plin struji kroz šaržu.
- Zidovi komore su hladni, pa se dijelovi šarže hlade ne samo konvekcijom plina koji kroz šaržu struji, već dodatno i zračenjem zagrijanih dijelova na hladne zidove komore.

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 [13]:

- Izrazito visoku otpornost na isparavanje
- Nizak kapacitet apsorpcije plinova
- Visoku sposobnost otplinjavanja
- Izrazito visoku čistoću

U tablici 3 prikazan je viskozitet i temperature ulja pri radu za tri tipa ulja tvrtke Hughton. 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.

Tablica 3. Viskozitet i temperature uporabe tri tipa ulja za hlađenje u vakuumskim pećima [13]

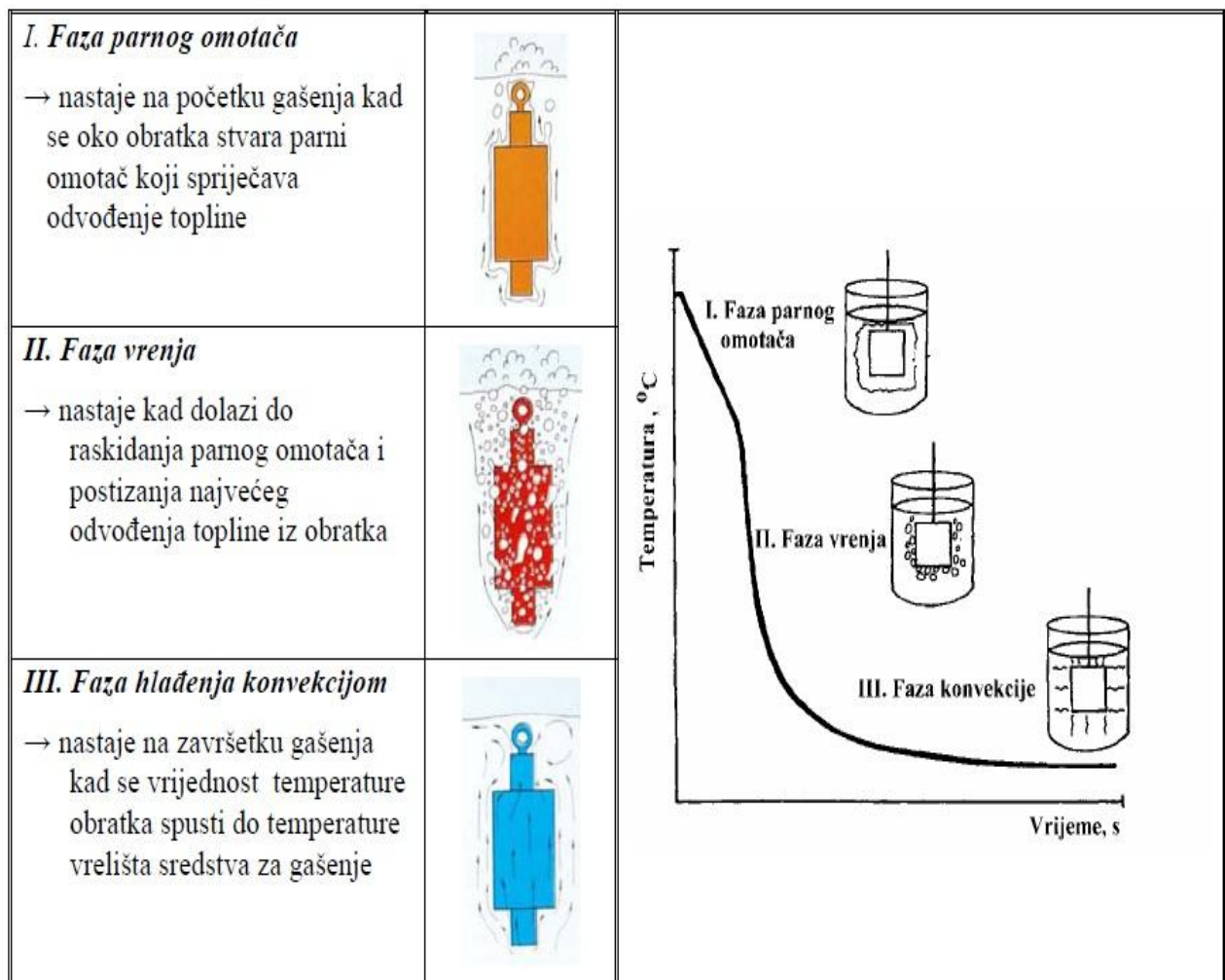
| OZNAKA           | VISKOZITET PRI 40°C<br>(mm <sup>2</sup> /s) | TEMPERATURE<br>UPORABE |
|------------------|---|------------------------|
| VACUQUENCH B 244 | 28  | 30 – 70 °C             |
| VACUQUENCH 305   | 30  | 40 – 80 °C             |
| VACUQUENCH 605   | 55  | 50 – 150 °C            |

Ukoliko sredstva za gašenje imaju vrelište niže od temperature obradka javlja se pojava pod nazivom Leidenfrostov efekt. Stvara se sloj pare koji odjeljuje obradak od ostatka tekućine i na taj način sprječava brzo hlađenje. To se najčešće događa kod ulja za kaljenje jer šaržirane obradke moramo ugrijati na temperaturu austenitizacije ( 1250° C).

Kod sredstava za gašenje podložnih Leidenfrost-ovom fenomenu pri gašenju ugrijanog obratka pojavljuju se tri faze : faza parnog omotača, faza vrenja i faza hlađenja konvekcijom. Ovisno o sredstvu za gašenje, obliku obratka i metodi gašenja, navedene faze se pojavljuju se različitim vremenskim periodima od početka gašenja, različite su po intenzitetu ohlađivanja, simultano se pojavljuju na površini obratka [5].

U tablici 4 prikazane su faze gašenja u sredstvu podložnom Leidenfrostovom fenomenu. U njoj se nalaze opisane sve tri faze, skica svake faze i dijagram kojemu se na osi apcisa nalazi vrijeme, a na osi ordinata temperatura i koji pokazuje vremenski slijed pojedinih faza.

Tablica 4. Faze gašenja u sredstvu podložnom Leidenfrostovom efektu [5]



### 3. Postupci toplinske obrade u vakuumskim pećima

U vakuumskim pećima provode se različiti postupci toplinske obrade koji poboljšavaju uporabna svojstva obrađivanih materijala. U ovom poglavlju biti će nabrojani i opisani postupci toplinske obrade koji se provode u vakuumskim pećima.

Postupci toplinske obrade u vakuumskim pećima su [5]:

- Kaljenje
- Žarenje
- Žarenje legura koji otvrdnjavaju precipitacijom
- Popuštanje
- Otplinjavanje
- Tvrdo i visokotemperaturno lemljenje
- Sinteriranje
- Nitiranje u plazmi
- Pougličavanje u plazmi

#### 3.4. Kaljenje u vakuumskih pećima

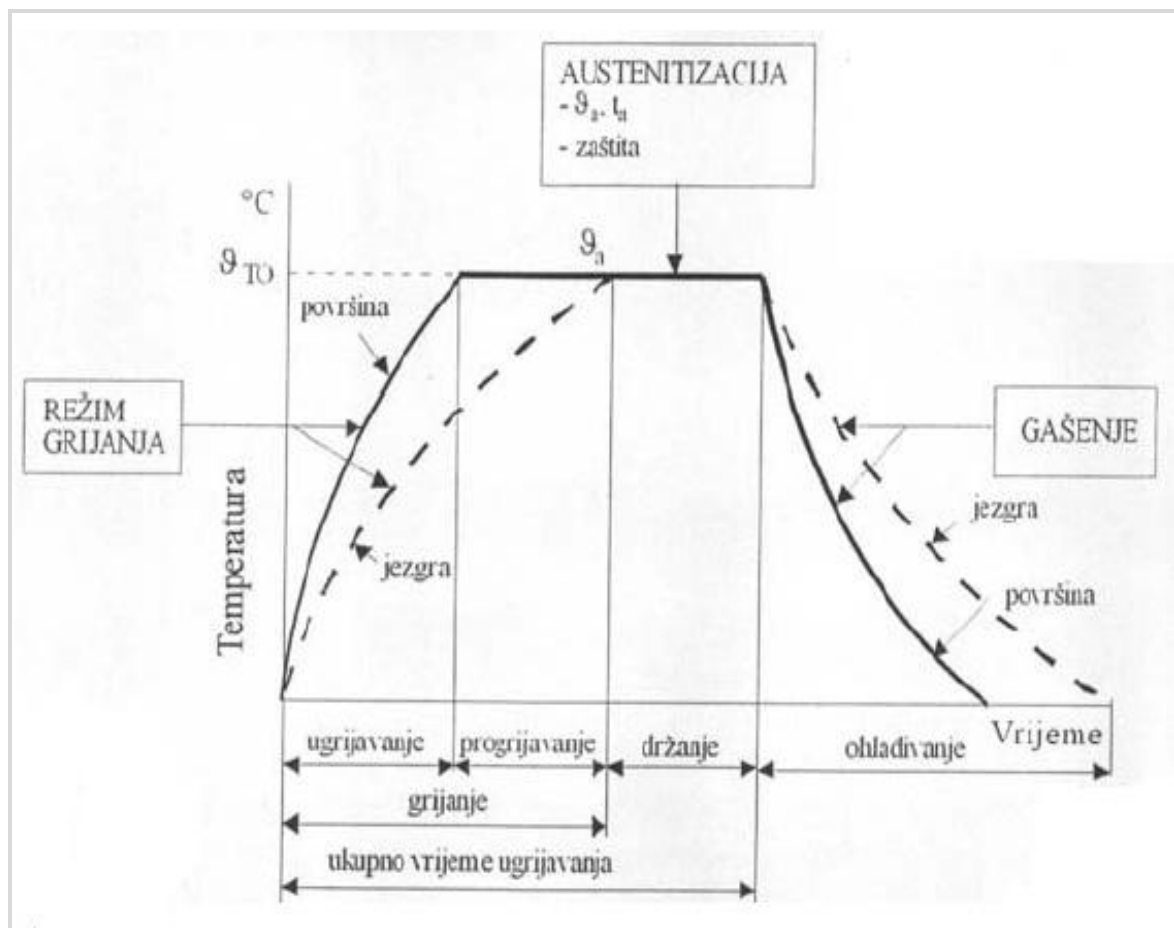
Temeljna je svrha kaljenja čelika:

- postizanje maksimalno moguće tvrdoće ovisno o udjelu ugljika u čeliku
- postizanje što jednoličnijeg prokaljenja tj. što jednoličnije tvrdoće po poprečnom presjeku

Postuka kaljenja sastoji se od:

- ugrijavanje na temperaturu austenitacije ( $\nu_a$ ) i progrijavanja
- držanja pri temperaturi austenitacije (u svrhu otapanja ugljika i legirajućih elemenata u austenitu)
- gašenja (u svrhu postizanja martenzitne mikrostrukture)

Na slici 18 prikazan je tehnološki dijagram postupka kaljenja. Prikazana je krivulja promjene temperature u vremenu. Crtkana krivulja pokazuje promjenu temperature jezgre pri ugrijavanju, držanju na temperaturi austenitizacije i gašenju, a puna krivulja pokazuje promjenu temperature površine obrađivanog dijela. Prikazano je kako se postupak ugrijavanja sastoji od ugrijavanja, progrijavanja i držanja.

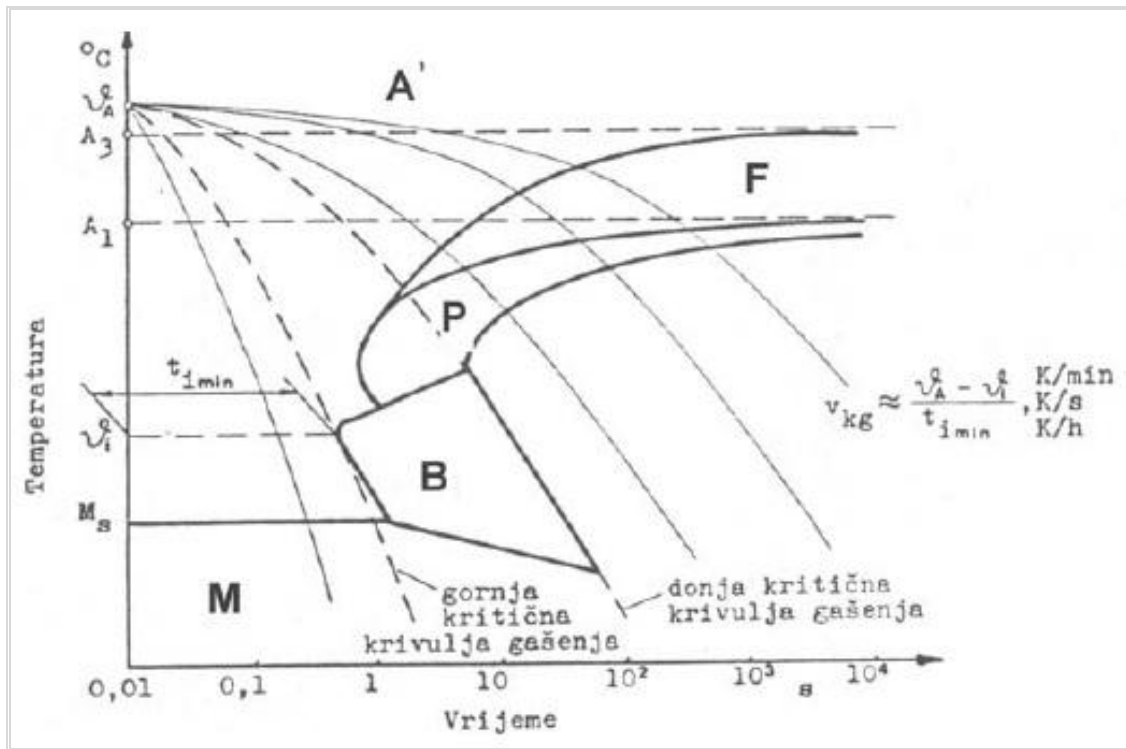


Slika 18. Tehnološki dijagram postupka kaljenja [5]

Kaljenje u vakuumskim pećima se sastoji od nekoliko dijelova. U komoru za zagrijavanje unesemo obrađivani materijal. Zatvorimo vrata vakuumske peći i pomoću crpki izvučemo zrak iz komore. Zatim započnemo proces ugrijavanja koji se sastoji od grijanja i držanja na temperaturi obrade. Nakon postizanja temperature austenitizacije i potrebnog vremena držanja na toj temperaturi isključujemo elemente koji zagrijavaju komoru i počinje proces gašenja. U komoru se upuhuje plin za gašenje (najčešće dušik ili argon) koji kruži oko obrađivanog materijala i hladi ga. Brzina gašenja mora biti veća od gornje kritične brzine gašenja koja se izračunava iz odgovarajućeg TTT-dijagrama [1]. Na slici 19 prikazan je

TTT-dijagram, gornja kritična krivulja gašenja kao i formula za izračunavanje gornje kritične brzine gašenja. Ukoliko želimo dobiti martenzitnu strukturu naša brzina gašenja ( $v_g$ ) mora biti veća od gornje kritične brzine gašenja ( $v_{kg}$ ).

$$v_g > v_{kg}$$

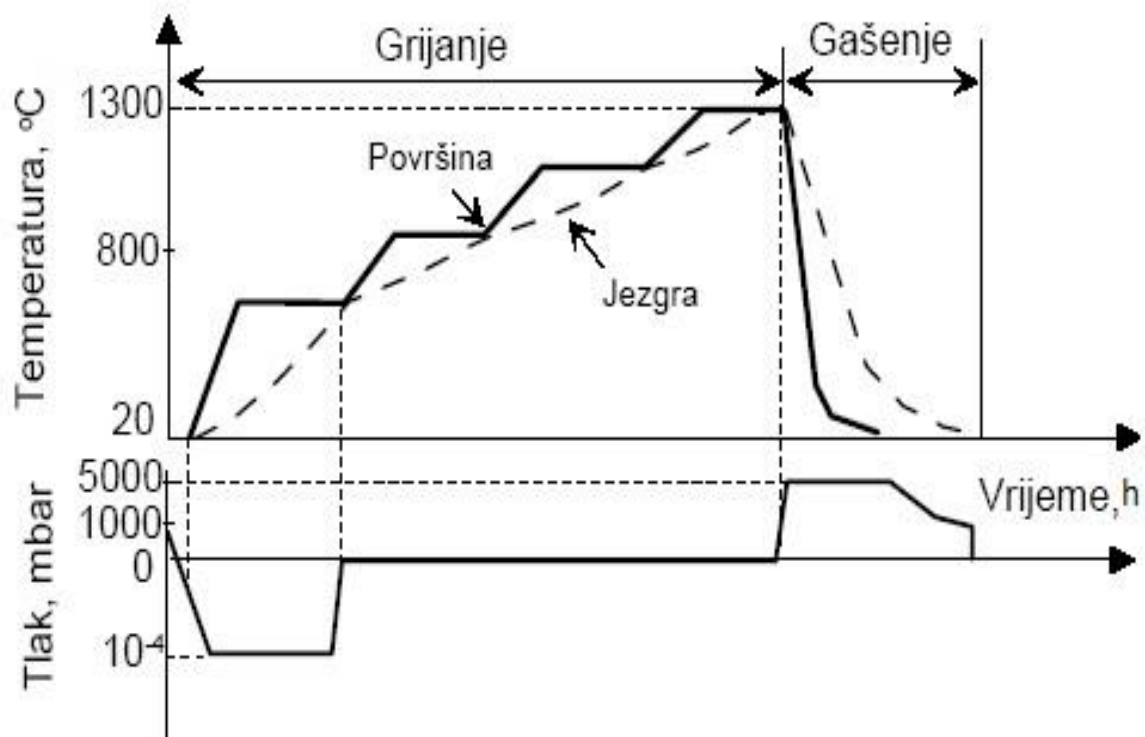


Slika 19. Prikaz TTT-dijagrama za podeutektoidne čelike [5]

Plin za gašenje nakon što „sakupi“ toplinu zagrijane šarže odlazi iz komore za hlađenje i putuje cijevima do izmjenjivača topline hlađenog vodom. Tamo zagrijani plin preda svoju toplinu i ponovno se cijevima vraća do ventilatora koji ga upuhuje u komoru za gašenje. Taj proces se ciklički ponavlja dok ne završimo proces gašenja.

Postoje dva tipa vakuumske peći s obzirom na položaj komponenata (kućište ventilatora, izmjenjivač topline i cijevi za dovod i odvod plina) vakuumske peći. Prvi tip ima kućište ventilatora, izmjenjivač topline i cijevi smještene unutar same komore za hlađenje. Kod drugog tipa vakuumske peći te komponente peći su smještene izvan komore za hlađenje. Oba tipa peći imaju svoje prednosti i nedostatke. Prvi tip peći ima jednostavan i kompaktan oblik te zauzima nešto manje prostora od drugog tipa vakuumske peći. Nedostat prvog tipa peći je ukoliko dođe do kvara na nekoj od komponenata (motor ventilatora, izmjenjivač topline...) moramo ukloniti cijelu komoru za hlađenje da bi mogli izvršiti popravak. Time možemo značajno oštetiti vakuumsku peć i izazvati pojavu propuštanja u budućnosti. Drugi tip peći

nema nedostatke prvog tipa. Kod njega se popravak može izvršiti lagano (jednostavnim skidanjem kućišta). Isto tako, komponente nisu izložene štetnom utjecaju topline ako se proces zagrijavanja i hlađenja odvija u istoj komori. Na slici 20 prikazan je uobičajeni postupak kaljenja uz primjenu predgrijavanja. Prikazan je i dijagram promjene tlaka u vremenu. Prvo predgrijavanje izvršeno je pri tlaku  $10^{-4}$  mbar-a. Nakon prvog predgrijavanja iznos tlaka poraste zbog toga što je u komoru za ugrijavanje ubačen inertni plin (dušik) koji služi za zaštitu od molekula koje mogu izazvati onečišćenja, a posljedica su selektivnog otparivanja. Ubacivanjem plina, isto tako, ubrzava se ugrijavanje uslijed konvekcije. Tlak drugi puta poraste na 5 bar-a prilikom ubacivanja plina za gašenje. Nakon provedbe postupka kaljenja otvaraju se vrata vakuumske peći i iznos tlaka je jednak atmosferskom tlaku [1].



Slika 20. Postupak kaljenje u vakuumskoj peći [5]

### 3.5. Žarenja u vakuumskoj peći

Postupci žarenja primjenjuju se u obradi raznih metala i njihovih legura u cilju postizanja specifičnih tehnoloških svojstava, kao što je npr. obradljivost. Postoji razmjerno veliki broj postupaka. Postupci žarenja se dijele u dvije skupine :

Postupci žarenja I. vrste su oni koji se provode pri temperaturama ispod temperature  $A_1$ :

- žarenje za redukciju zaostalih naprezanja
- rekristalizacijsko žarenje

Kod ovih postupaka žarenja, dakle, ne dolazi do prekrystalizacije mikrostrukture tj. nema promjene kristalne rešetke.

Postupci žarenja II. vrste koji se provode na temperaturama oko ili iznad temperature  $A_1$  (kod njih dolazi do prekrystalizacije mikrostrukture):

- sferoidizacijsko žarenje
- normalizacijsko žarenje
- homogenizacijsko žarenje (difuzijsko žarenje)

Provedbom postupaka žarenja u vakuumskim pećima dobijemo bolja svojstva obrađivanog materijala u odnosu na ostale peći za toplinsku obradu. Ne dolazi do oksidacije niti stvaranja uključaka. Površina je metalno sjajna i nije potrebno naknadno čišćenje. Nema razugljenja pri višim temperaturama. Materijal pokazuje veću izotropnost svojstava [16]. Na slici 21 prikazana vakuumska peć za žarenje tvrtke B.M.I.. Njezin volumen je 450 x 450 x 450mm, a najveća dopuštena masa šarže je 150kg. Maksimalna temperatura koju ona postiže je 750°C, a iznos tlaka plina za hlađenje je 1,2 bar-a. Najniža razina vakuuma koja se može ostvariti je unutar komore za obradu je  $5 \times 10^{-3}$  bar-a [15].



Slika 21. Vakuumska peć za postupke žarenja tvrtke B.M.I [15]



### 3.6. Lemljenje u vakuumskim pećima

Lemljenje je postupak kojim se metalni ili nemetalni dijelovi spajaju pomoću rastaljenog dodatnog materijala (lema) u nerazdvojnu cjelinu. Pri lemljenju se osnovni materijal ne tali, jer ima više talište od dodatnog materijala. Bolji rezultati pri lemljenju mogu se postići primjenom "topitelja" (prašak, pasta, otopine) i/ili zaštitne atmosfere (plin ili vakum) u kojoj se vrši lemljenje. Uz kovačko i ljevačko zavarivanje, lemljenje je jedan od najstarijih postupaka spajanja metala (staro koliko i dobivanje i prerada materijala, oko 5000 - 6000 godina). U početku je lemljenje korišteno za spajanje dijelova nakita iz zlata i platine, a kasnije i srebra.

Danas se lemljenje koristi u masovnoj proizvodnji za spajanje čelika, aluminija i raznih drugih materijala (automobilska i avionska industrija široko primjenjuju lemljenje). Razvijeno je i lemljenje Zr, Ti, Be, metala s visokim talištem, kompozitnih materijala, kao i međusobno spajanje keramike i metala [1].

Lemljenje u vakuumskoj peći se odvija bez prisutstva zraka. Korištenje specijaliziranih vakuumskih peći (slika 22) donosi mnoge prednosti: izvanredno čist spoj (bez praška) sa boljim spajanjem i većom čvrstoćom. Temperatura je u vakuumskoj peći prostorno jednoličnija, a zaostala naprezanja manja zbog polaganog zagrijavanja i dobrog ciklusa hlađenja. To uzrokuje značajno poboljšanje toplinskih i mehaničkih svojstava materijala. Kao i konvencionalno lemljenje, lemljenje u vakuumskim pećima lako se prilagodi masovnoj proizvodnji [1].



Slika 22. Vakuumska peć za postupke lemljenja tvrtke Ipsen (Titan Type-6) [1]

### 3.7. Sinteriranje u vakuumskim pećima

Sinteriranje je postupak proizvodnje dijelova iz praška. Zrnca praška se zagrijavaju dok se ne „priljube“ jedno uz drugo. Temperatura sinteriranja ne premašuje temperaturu taljenja osnovnog materijala. Sinteriranje se uobičajeno koristi za izradu dijelova iz različitih materijala kao što su čelik, keramika i cermet. Sinteriranje se bavi grana znanosti koja se zove praškasta metalurgija.

Sinteriranje u vakuumskoj peći ima mnoge prednosti [1]:

- Dijelovi proizvedeni sinteriranjem imaju odličnu dimenzijsku točnost i glatku površinu.
- Velika čistoća materijala i izotropna svojstva po čitavom volumenu.
- Obradak bez uključaka .
- Veća čistoća obradka zbog manjeg broja postupaka proizvodnje koje treba izvršiti da bismo dobili gotov proizvod.
- Poroznost prisutna kod sinteriranih elemenata korisna je pri proizvodnji filtera i ležaja.
- Vatrootporni materijali koje je nemoguće oblikovati drugim postupcima toplinske obrade proizvode se sinteriranjem.
- Moguće je proizvesti veliki raspon dijelova sa različitim električnim i magnetskim svojstvima.

Kontrola zagrijavanja, temperature i atmosfere u procesu mora biti omogućena kako bi postigli najbolje moguće rezultate. Vakuumaska peć omogućuje sve potrebne zahtjeve kao i automatizirano vođenje procesa sinteriranja [1].

### 3.8. Cementiranje u vakuumskoj peći

Cementiranja čelika je postupak obrade koji se sastoji od:

- termokemijske obrade pougljičenja (obogaćivanje površinskih slojeva proizvoda ugljikom) i
- kaljenja pougljičenog proizvoda i niskotemperaturnog popuštanja

Dakle, može se reći da je

cementiranje = pougljičenje + kaljenje + niskotemperaturno popuštanje.

Osnovni je cilj cementiranja postizanje tvrdih površinskih slojeva strojnog dijela otpornih na trošenje („visoka tvrdoća“), a da pri tome jezgra strojnog dijela postigne što višu otpornost na udarna opterećenja („žilavost“). Za cementiranje su naročito prikladni ugljični i nelegirani čelici s max. 0,25%C. Tipični primjer strojnih dijelova koji se podvrgavaju postupku cementiranja jesu zupčanici i bregaste osovine automobila.

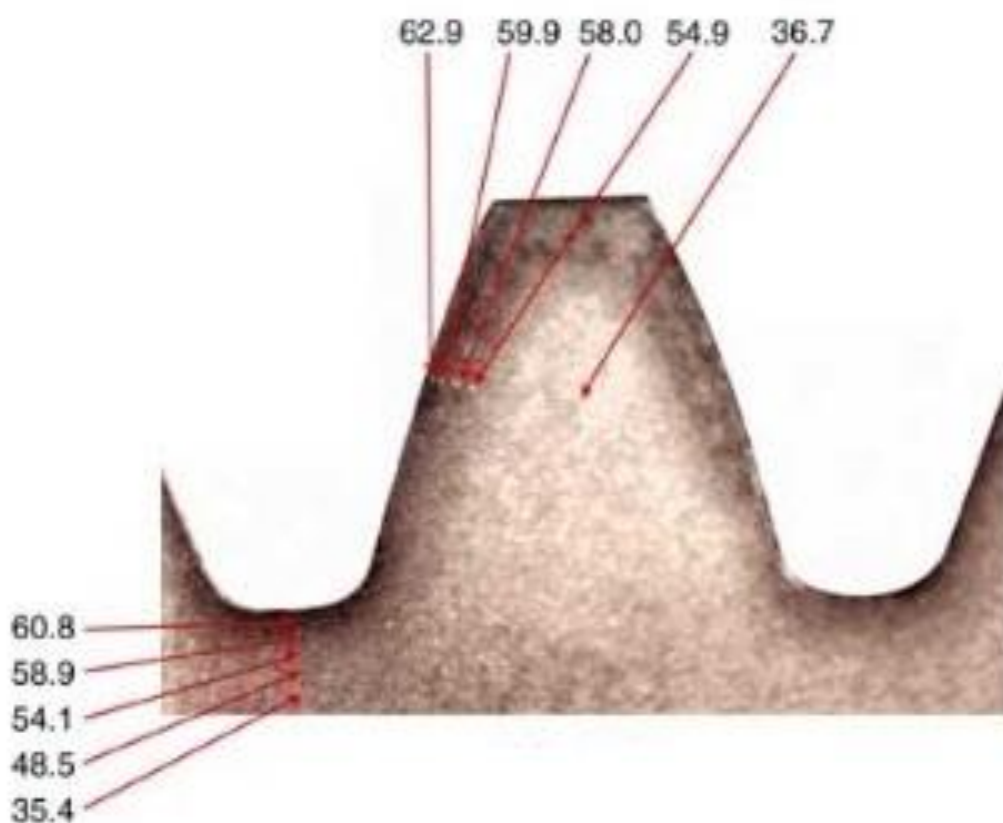
Postupak pougljičavanja provodi se u sredstvu koje je u stanju da na temperaturi austenitizacije čelika (900 do 950°C) predaje čeliku ugljik. Dubina površinskih slojeva obogaćenih ugljikom (i time visoko zakaljivih) iznosi obično 0,5 do 1,5mm kod spomenutih strojnih dijelova [2].

Prednosti pougljičavanja u vakuumu u odnosu na konvencionalno pougljičavanje:

- ponovljivost unutar  $\pm 25\mu\text{m}$
- manja promjena mjera i progiba
- bolja otpornost na zamor materijala
- bolja kontrola kemijskog sastava površinskog sloja
- proces obrade je ekološki prihvatljiv

### 3.6. Nitiranje u vakuumskim pećima

Nitiranje je postupak obogaćivanja površinskih slojeva dušikom. Sredstva za nitiranje (tekuća, plinovita ili ionizirane plinske atmosfere) daju dušik u površinski sloj čelika. Proces se provodi pri temperaturama 500 do 580°C u trajanju od nekoliko sati. Pri tome nastaje tanki sloj nitrida (kemijski spojevi željeza i dušika). Nitiranje se prvenstveno provodi u cilju povećanja otpornosti površine prema adhezijskom mehanizmu trošenja, te povećanju otpornosti na koroziju, a rezultira i povećanjem tvrdoće (između ostalog i iz razloga što je dušik dijelom otopljen u feritu). Na slici 23 prikazan je presjek dijela zupčanika nakon postupka nitiranja. Brojke izražavaju tvrdoću u Rockwell-ovoj skali (HRC). Površinski sloj je obogaćen dušikom i njegova tvrdoća je veća. Sama jezgra ne sadrži nitride i njezina tvrdoća je zato manja [2].



Slika 23. Presjek dijela zupčanika s označenim iznosima tvrdoće (HRC) na pojedinim mjestima. [5]

Tipični proces nitiranja u vakuumskoj peći sastoji se od nekoliko koraka [9]:

- Unos šarže u komoru za nitriranje i zatvaranje vrata vakuumske peći.
- Pomoću crpki ostvaruje se iznos vakuuma od oko  $10^{-5}$  bar-a.
- Punjenje komore sa dušikom dok se ne postigne parcijalni tlak dušika od 1 bar i uključivanje ventilatora koji služe za cirkuliranje dušika oko šarže.
- Zagrijavanje peći do temperature nitriranja (500 - 580°C)
- Smanjenje parcijalnog tlaka dušika na iznos manji od 1 bar i, nakon toga, punjenje komore s amonijakom dok ukupni tlak u peći ne dostigne vrijednost 1 bar-a.
- Cirkuliranje plinova oko obradka dok se ne postigne odgovarajuća dubina nitriranja.
- Hlađenje obrađene šarže i vađenje šarže iz peći.

Proces nitriranja u vakuumskih pećima sadrži sve prednosti koje su nabrojane kod pougljičavanja u vakuumskoj peći, ali i dodatnu prednost precizne kontrole sadržaja dušika u površinskom sloju te dubina nitriranja obradka koja se odvija pomoću računala.

## 4. Prednosti i nedostaci vakuumskih peći

Postoje mnoge prednosti, ali i neki nedostaci vakuumskih peći u odnosu na ostale tipove peći (plamene peći, električne peći...). Vrste metalnih materijala koje možemo toplinski obraditi u vakuumskim pećima su: alatni čelici (za hladni rad, za topli rad i brzorezni), nehrđajući čelici, legirani čelici za poboljšavanje, legirani čelici za cementiranje, vatrootporni čelici i superlegure na bazi Ni i Co [5].

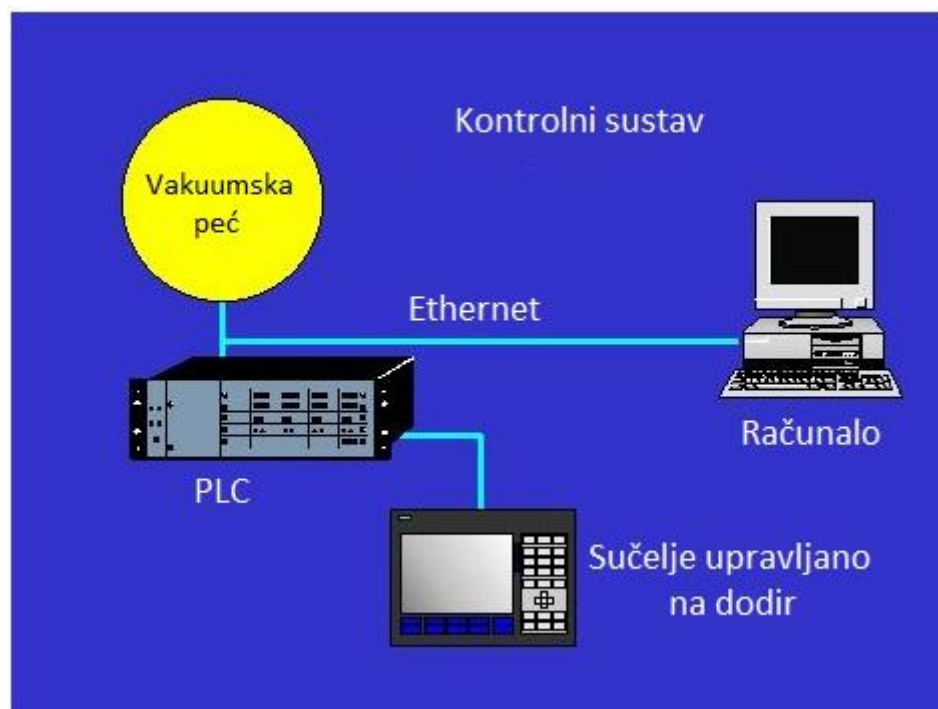
Prednosti vakuumskih peći su [5]:

- Predmet toplinski obrađen u vakuumskoj peći nije podložan procesu oksidacije zbog toga što je u komori za ugrijavanje vakuum i nema čestica koji bi stvarale štetne spojeve. U procesu ugrijavanja, na temperaturu obrade, dolazi do razgradnje postojećih oksida. Posljedica toga je velika čistoća obrađivanog materijala i metalni sjaj. Nema razugljenog rubnog sloja i nije potrebno naknadna obrada materijala. Na slici 24 prikazani su predmeti obrađeni u vakuumskoj peći koji imaju metalni sjaj.



Slika 24. Predmeti obrađeni u vakuumskoj peći imaju metalni sjaj [5]

- Značajno manje deformacije i promjene mjera (iskrivljenja) u odnosu na ostale načine toplinske obrade. To je posljedica odgovarajućeg šaržiranja i gašenja u struji stlačenog plina ili smjesi plinova.
- Najpogodniji uvjeti za automatsko vođenje procesa obrade uz visoku ponovljivost postupka. Na slici 25 prikazan je primjer kontrolnog sustava za upravljanje sa udaljenog računala. Programabilni logički kontroler (PLC) upravlja radom vakuumske peći, a on se može programirati pomoću sučelja upravljanog na dodir ili sa udaljenog računala pomoću industrijske mreže (Ethernet).



Slika 25. Kontrolni sustav za upravljanje sa udaljenog računala [12]

- Mogućnost izvođenja više postupaka u jednom ciklusu (npr. lemljenje+ kaljenje+ popuštanje)
- Najhumaniji radni uvjeti za poslužitelja peći
- Obrada bez otpadnih tvari i zagađivanja okoline

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 toplinske obrade, ali i znatno povećanje cijene u odnosu na druge peći za toplinsku obradu [12].

## 5. Tipovi vakuumski peći

Postoji širok spektar tipova vakuumskih peći koje su konstruirane prema zahtjevima korisnika odnosno prema obliku i volumenu obradaka. Mogu se koristiti u različite svrhe koje uključuju kaljenje, žarenje, sinteriranje, nitriranje, cementiranje te sve ostale inačice postupaka kojima se površina obogaćuje određenim kemijskim elementima, otplinjavanje, postupak kemijskog prevlačenja iz parne faze te niz ostalih, ranije navedenih postupaka.

Proizvođači vakuumskih peći kao što su SECO/WARWICK ili IPSEN ostvarili su izuzetne tehnološke pomake u razvoju tehnologija i vrsta vakuumskih peći. Primjerice, jedna od novih tehnologija je i pougljičavanje u vakuumu, za koje se primjenjuju napredni upravljački sustavi s integriranim sustavom raspodjele energije i vrlo kompleksnim oblikom automatizacije. Jedna od glavnih karakteristika suvremenih vakuumskih peći, no i svih ostalih sustava koji se primjenjuju u proizvodnji, jest upravo visoki stupanj automatizacije kojem je cilj prvenstveno oslobađanje čovjeka napornog te često i opasnog rada, te na kraju smanjenje troškova odnosno potreba za ljudskim resursima. Glavni cilj svakog ozbiljnog proizvođača vakuumskih peći jest konstrukcija peći i procesa koji će omogućiti skraćivanje vremenskog ciklusa obrade uz maksimalnu energetska učinkovitost te minimalno izobličenje oblika obradaka uz, dakako, povećanje kvalitete gotovih proizvoda [9].

U nastavku slijedi podjela i opis četiriju najvažnijih oblika vakuumskih peći te njihove karakteristike. Za svaki od tih oblika izabran je po jedan predstavnik, čiji opisi također slijede. Prema konstrukcijskoj izvedbi, vakuumske peći dijelimo na [5]:

1. Horizontalne jednokomorne peći
2. Horizontalne višekomorne peći (peći s hladnom komorom)
3. Vertikalne jamske peći
4. Vertikalne peći sa spuštajućim dnom



## 5.9. 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 [5]. U upotrebi su horizontalne jednokomorne peći s dva različita oblika komora:

- Komora pravokutnog presjeka
- Komora okruglog presjeka

Prvi oblik karakterizira vertikalni smjer ohlađivanja (odozgo/odozdo), s tlakovima plina za ohlađivanje do 10 bar. Volumen radne komore kreće se od 108 do 675 l, a mase šarži koje iste mogu zaprimiti kreću se u rasponu od 200 do 800 kg [9].

Drugi oblik, odnosno vakuumske horizontalne peći s komorom okruglog presjeka, karakterizira radijalni (preko sapnica) te aksijalni smjer ohlađivanja (ventilatorom), te povećani pritisci plina za ohlađivanje u odnosu na peći s pravokutnim presjekom komore (do 25 bar). Volumen radne komore također je veći i iznosi od 1300 do 6060 l, te je samim time omogućena i obrada šarži veće mase (680 – 4530 kg) [9].

U nastavku će biti opisan jedan od predstavnika ove vrste vakuumskih peći – jednokomorna vakuumska peć sa sustavom gašenja pod visokim tlakom proizvođača SECO/WARWICK S.A., model 25.0VPT-4035/36IQN.

### 5.9.1. Opis horizontalne jednokomorne peći

Uzimajući u obzir karakteristike obiju vrsta horizontalnih vakuumskih horizontalnih peći, proizvođač SECO/WARWICK konstruirao je vakuumsku peć (slika 26) koja objedinjuje parametre jednokomornih te višekomornih, pa čak usporedivu i sa sustavima gašenja u ulju. Svoju primjenu nalazi naročito u tvrtkama malih i srednjih veličina, ali upotrebljava se također i u teškoj industriji pa čak i masovnoj proizvodnji. [9]



Slika 26. SECO/WARWICK horizontalna jednokomorna vakuumska peć [9]

Ova univerzalna horizontalna jednokomorna peć konstruirana je tako da omogućuje primjenu nove tehnologije visokotemperaturnog pougljičavanja s kontrolom rasta zrna, kaljenje pri visokim tlakovima te žarenje u jednom ciklusu. Peć posjeduje mogućnost odabira naprednih mogućnosti gašenja kao što su martempering i austempering, Opremljena je sa suvremenim sustavom raspodjele energije koji omogućuje uštedu električne energije. Konstrukcija se

sastoji od komore kružnog presjeka s grafitnom izolacijom te kružno i ravninski raspoređenim grijaćim elementima. Sustav je opremljen mlaznicama za plina koje služe za gašenje te je prilagođen za upotrebu dušika, helija i vodika pri tlakovima i do 24 bar [9]. U tablici 5 prikazane su osnovne tehničke karakteristike.

Tablica 5. Tehničke karakteristike SECO/WARWICK horizontalne jednokomorne peći [9]

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| Dimenzije vruće komore (mm):   | 600/600/900 mm                              |
| Masa šarže (kg):               | 800 kg                                      |
| Radna temperatura (°C):        | 1320°C                                      |
| Maksimalni vakuum (mbar):      | 10 <sup>-2</sup> bar                        |
| Snaga grijaćeg sustava (kW):   | 150 kW                                      |
| Tlak hlađenja (bar):           | 24 bar, N <sub>2</sub> , He, H <sub>2</sub> |
| Snaga motora za hlađenje (kW): | 220 kW                                      |

Sustav hlađenja sastoji se od sljedećih dijelova: kompresora smještenog na stražnjoj strani peći, sustava cilindričnih mlaznica smještenih na bočnim stranama i prednjoj strani grijaće komore, povratnog ventila za izlaz plina i izmjenjivača topline s vodom kao medijem. Plin za gašenje cirkulira sljedećim redoslijedom: kompresor → mlaznice → komora → povratni ventil → izmjenjivač topline → kompresor. Sustav hlađenja mlaznicama karakterizira ravnomjeran raspored i visoka brzina plina za gašenja. Brzina plina na izlazu iz mlaznice kreće se u redu veličina od 70 m/s do 100 m/s za dušik [9].

Provedeni su različiti testovi kojima se ustanovila da je ova vakuumska peć pružila vrlo dobar rezultat u kaljenju nekih vrsta čelika kao što su 16MnCr5, 20MnCr5 i 18CrNi8 za koje se do tada mislilo da su najpogodniji ili za gašenje u ulju ili u pećima sa više komora. Može se zaključiti kako ova vrsta vakuumskih peći relativno jednostavne izvedbe, pruža odlične karakteristike uz niža kapitalna ulaganja te objedinjuje mogućnosti korištenja u masovnoj proizvodnji i felksibilnosti [9].

## **5.10. Horizontalne višekomorne peći (peći s hladnom komorom)**

Sljedeća skupina horizontalnih peći su horizontalne dvokomorne ili 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 koje posjeduju sljedeće osobine:

### **A. Horizontalne dvokomorne vakuumske peći**

Maksimalna im je radna temperatura ovisna o vrsti upotrebljivanih grijača, grafitni grijači podržavaju temperature do 1320°C, dok se molibdenskim grijačima može postići temperatura od 1600°C. Volumen radne komore kreće se u vrijednostima od 25 do 700 l, a obrađuju se šarže mase od 60 do 1000 kg. Ohlađivanje se vrši u struji zraka ili u ulju i odvija se u zasebnoj komori, u odnosu na ugrijavanje [5].

### **B. Horizontalna trokomorna vakuumska peć**

Sastoji se od: integrirane predkomore, komoru s visokim temperaturama i komore za ohlađivanje/gašenje. Uloga predkomore je dodatno osiguravanje šarže od pojave propusnosti, veći stupanj automatizacije vakuumske peći i povećanje proizvodnosti. Ostale karakteristike približno su slične dvokomornim pećima [5].

### **5.10.1. Opis horizontalne višekomorne peći**

Jednostavne atmosferske peći za toplinsku obradu koje odvajaju proces ugrijavanja od procesa ohlađivanja/gašenja prisutne su u upotrebi otkako je prva takva peć predstavljena početkom 20. stoljeća. Slično tome, vakuumske peći koje odvajaju proces ugrijavanja od procesa gašenja u ulju na tržištu se nalaze već desetljećima. No tek se nedavno, otkako je razvijena tehnologija cementiranja pri niskom tlakovima, razvijena i tehnologija koja uključuje gašenje plinovima visokog tlaka u dvokomornim pećima. Odvajanjem procesa ugrijavanja, gašenja i manevriranja šaržama omogućeno je povećanje proizvodnosti. Kod ove

vrste peći ugrijavaње na određenu temperaturu u vakuumskoj atmosferi omogućuje sljedeće prednosti s obzirom da se odvija u posebnoj komori [9]:

- Šarže se mogu ugrijavati onom brzinom kojom materijal može apsorbirati toplinu.
- Iskorištena energija grije samo šarže ne i komoru za ugrijavaње i izolaciju pri svakom ciklusu.
- Pošto je sustav hlađenja odvojen, mnogo je veća iskoristivost komore za ugrijavaње.
- Komora za ugrijavaње nije podložna visokim tlakovima i brzinama sredstva za gašenje tijekom gašenja što rezultira značajno dužim vijekom trjanja vruće zone.
- Potrebno je manje energije pošto je veća iskoristivost komore za ugrijavaње.

Gašenjem u hladnoj komori također su omogućene određene prednosti:

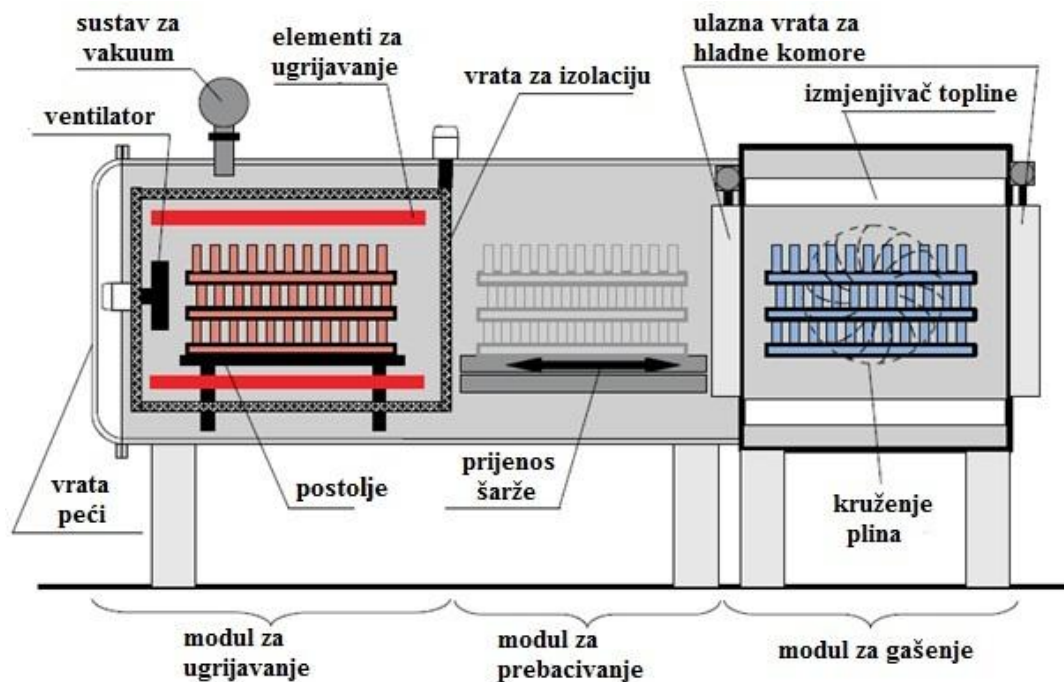
- Veći broj nisko legiranih materijala može pouzdano biti gašen.
- Apsolutna kontrola distribucije plina za još ravnomjernije gašenje.
- Pojednostavljeni sustav hlađenja omogućuje izmjenični protok plina za kontrolu distorzija bez kolizije sa opremom za grijanje ili rukovanje.
- Moguća upotreba najvećih brzina i tlakova gašenja bez opasnosti od eventualne krhkosti konstrukcije komore za ugrijavaње.

Odvojen sustav rukovanja šaržama karakterizira:

- Mehanizam se suočava sa visokim temperaturama jedino pri utovaru/istovaru komore za ugrijavaње.
- Mehanizam ne predstavlja prepreku protoku plina za gašenje.
- Motori i sklopke nalaze se izvan vakuumske atmosfere.

U usporedbi sa horizontalnim jednokomornim vakuumskim pećima, očigledne su prednosti uvođenja druge komore za gašenje. Veća učinkovitost gašenja omogućila je bolju toplinsku obradu metala slabije prokaljivosti (niskolegirani čelici). Brige oko oštećenja komore zbog gašenja su eliminirane te je omogućeno ostvarivanje tlaka od 20 bar za svega 3 sekunde čime su brzine gašenja potisnute ispred početka krivulja faznih pretvorbi u TTT dijagramu. Također je riješen problem erozije stijenke komore kojeg su uzrokovale visoke brzine plina

za gašenje. Nadalje, iako je postupak cementiranja pri niskim tlakovima moguć i u jednokomornim vakuumskim pećima, pitanja je vremena kada će se čađa pojaviti u izmjenjivaču topline, te samim time i kada će se čađa probiti do motora ventilatora za gašenje, što onda može uzrokovati visoke troškove popravka [9].



Slika 27. Shematski prikaz horizontalne dvokomorne vakuumske peći [9]

Na slici 27 prikazana je shema dvokomorne vakuumske peći. Komora za grijanje obavijena je tzv. vrućom zonom koja obuhvaća više izolacijskih slojeva od grafita ili keramike. Grafitni grijaći elementi nalaze se na bočnim stranama komore što omogućava brzo i jednoliko ugrijavanje šarži sa mogućim odstupanjima od  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ . Naravno, sve moderne vakuumske peći danas omogućavaju konvekcijsko ugrijavanje obradka. Nakon zatvaranja komore, ista se puni nekim od plinova, a najčešće su to  $\text{N}_2$  ili  $\text{He}$  koji cirkuliraju prilikom ugrijavanja što osigurava konvekcijsko ugrijavanje. Takav način grijanja ima nekoliko prednosti:

- Niži temperaturni gradijent pojedinih komponenti i unutar same šarže.
- Brže ugrijavanje, posebno za šarže velikog volumena.
- Jednoliko ugrijavanje

Postolje u komori za ugrijavanje (eng. heart) izrađuje se od silicijevog karbida što mu garantira odličnu otpornost na trošenje čak i pri visokim temperaturama. U komori nema pokretnih dijelova osim konvekcijskog ventilatora izvedenog od kloroflorouglijika (CFC). Za transport šarži između dviju komora u modulu za prebacivanje se nalazi i teleskopska vilica koja vrlo brzo prebacuje predmete iz modula za ugrijavanje u modul za gašenje te su tim toplinski gubici svedeni na minimum. Upravljački mehanizam je, kao i senzori i pogonski sustav, smješteni izvan komore radi lakšeg održavanja. Komora za gašenje/ohlađivanje može se prilagođavati potrebama korisnika s obzirom na zahtjeve šarži. Prilikom gašenja moguće je postići tlakove od 20 bar [9]. Cirkulacija plina za gašenje ostvaruje se također prema zahtjevima korisnika; identificiraju se zahtjevi te se konfiguracija sustava prilagođava s obzirom na njih, pri tome koristeći:

- Jedan ili dva ventilatora
- Jedan ili dva izmjenjivača topline
- Dinamičke sposobnosti gašenja
- Povratne tokove plina koji se posebno koriste za kontrolu distorzije za dijelove mase veće od 1 kg
- Varijabilne brzine ventilatora

Svi navedeni elementi sustava za gašenje omogućavaju prilagodbu na zahtjeve procesa, te se u slučaju potrebe vrlo brzo i jednostavno podešavaju.

Horizontalne dvokomorne vakuumske peći upotrebljavaju se za žarenje do temperatura od 1250°C, te cementiranje pri niskim tlakovima do 1050°C. Ako je omogućena upotreba različitih plinskih atmosfera (N<sub>2</sub>, He, Ar) moguća je i obrada visokolegiranih čelika: alatnih čelika, brzoreznih čelika te čelika proizvedenih metalurgijom praha (PM). Sustav je u potpunosti automatiziran te se svim parametrima upravlja preko računala [9]. Na slici 28 prikazana jedna izvedba horizontalne dvokomorne vakuumske peći.



Slika 28. Horizontalna dvokomorna vakuumska peć [9]

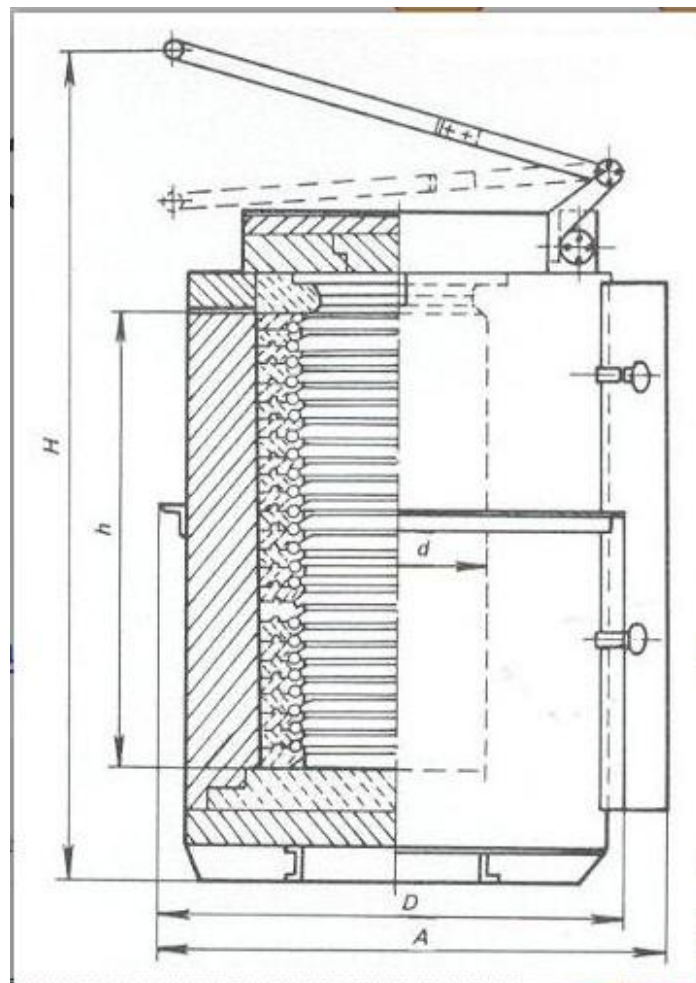
### 5.11. Vertikalne jamske peći

Sljedeći tip vakuumskih peći jesu vertikalne jamske peći (slika 29 i slika 30). U godinama prije krize mnoge su zemlje značajno povećale ulaganja u energetske sektor, posebno za razvoj i izgradnju različitih vrsta elektrana. Samim time povećana je i potreba za proizvodnjom različitih otkivaka iz srednje i visokolegiranog čelika te nehrđajućih čelika. Kada govorimo o otkivcima koji se koriste za primjenu u proizvodnji turbina ili generatora, uglavnom je riječ o izradcima vrlo velikih dimenzija. Iz tog je razloga trebalo prilagoditi ne samo tehnologiju kovanja, nego i sam proces toplinske obrade kako bi se omogućilo jednostavnije upravljanje te kraće vrijeme samog procesa. Jasno je vidljivo da se radi o pećima namjenjenima obradi predmeta većeg obujma nego što je slučaj kod horizontalnih peći. Postoji još jedan razlog njihove upotrebe, naime, prilikom toplinske obrade izduženih predmeta, lako može doći do progiba uzrokovane toplinom, 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. U nastavku slijedi opis jedne takve vakuumske peći [11].





Slika 29. Vakuumska vertikalna jamska peč [16]



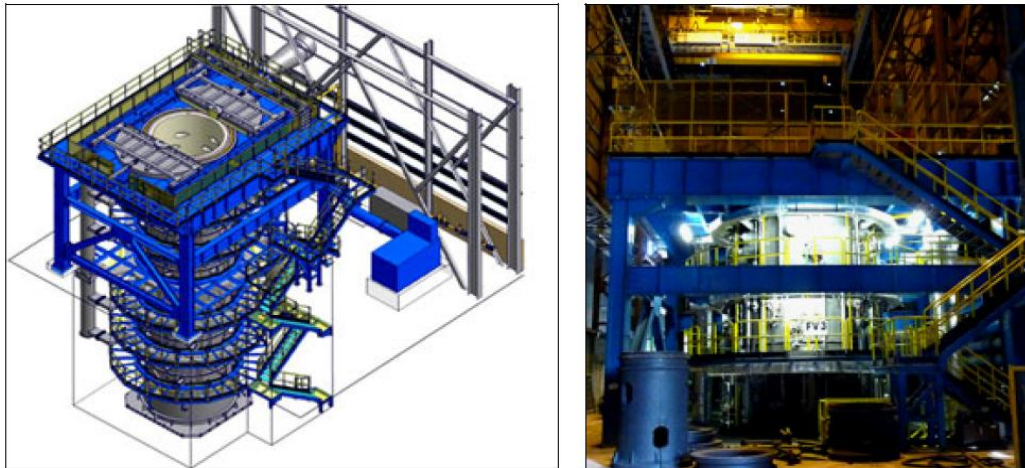
Slika 30. Shematski prikaz vertikalne jamske peći [16]

### 5.11.1. Opis vertikalne jamske peći za obradu velikih dijelova

Prije dolaska do toplinske obrade u vakuumskim pećima otkivci su prethodno najčešće grubo obrađeni. U samoj peći mora se postići jednoliko longitudinalno temperaturno polje bez kojeg ne možemo dobiti izradak homogenih mehaničkih karakteristika bez deformacija. Nadalje, potrebno je uzeti u obzir da se uglavnom radi o tankim i dugačkim obradcima te je prisutan problem njihovog pridržavanja unutar peći. Specifikacija vertikalne jamske peći za obradu većih otkivaka je sljedeća [16]:

- Maksimalna temperatura obrade 1250°C
- Maksimalna masa šarže 4000 kg
- Maksimalni promjer otkivka 600 – 2000 mm
- Maksimalna dužina otkivka 2000 mm
- Minimalni temperaturni gradijent 50°C/h
- Uniformnost temperature na površini otkivka ±5°C
- Razina vakuuma 10 – 5 mbar
- Maksimalni tlak gašenja 20 bar

Slika 31 prikazuje 3D model i gotovu konstrukciju jedne vertikalne jamske peći. Motorizirana platforma instalirana je na vrhu kako bi se olakšale transportne operacije te pregled peći s vrha. Kružno kućište ima unutarnji promjer od 3000 mm te visinu 3500 mm, izvedeno je od modularnih prirubničkih spojeva kako bi se omogućilo spajanje na licu mjesta te prihvat mase platforme. Duž opsega kućišta na različitim razinama smještene su tangencijalno postavljene otvori i postavljeno više od 100 grijačkih elemenata (slika 31.) [16].



Slika 31. Prikaz 3D modela i gotove konstrukcije vertikalne jamske peći [11]

Neki manji otvori predviđeni su za postavljanje kontaktnih termoparova čija je zadaća detektirati temperaturu površine obradka na različitim nivoima. Drugi su otvori pak predviđeni za smještaj termoparova za kontrolu procesa koji otkrivaju temperaturne zone. Svaki navedeni senzori povezani su u jedan upravljački sustav. Vatrostalne obloge peći konstruirane su tako da izdržavaju cikluse grijanje/ohlađivanje s razlikom temperatura od  $1250^{\circ}\text{C}$ . Vertikalna vakuumska peć se sastoji od nekoliko kombinacija vatrostalnih slojeva za različite dijelove peći: dno, zidovi i vrata. Visoke temperature i otkivci velikih masa zahtjevaju temeljitu razradu konstrukcije dna te oplošja peći. Unutarnje oplošje izrađeno je iz grafita i keramičkih materijala kako bi se maksimizirala iskoristivost toplinske enegije [16].



Slika 32. Grijači elementi u obliku cijevi [11]

Peć je opremljena s integriranim sustavom za gašenje/ohlađivanje, koji se sastoji od ventilatora, izmjenjivača topline te odgovarajućeg sustava vođenja plina za gašenje. Za visokolegirane materijale koji se upotrebljavaju u avioindustriji, nadpritisak plina za gašenje od 2 bara je uglavnom zadovoljavajući, no alatna industrija zahtjeva nadpritisak od 20 bar. Integrirani sustav za gašenje nema intenzitet gašenja poput onog s izoliranom „hladnom komorom“, no eliminira se potreba za transportom vrućih dijelova koji su itekako podložni distorziji. Ovisno o situaciji, moguće je realizirati različite metode gašenja/ohlađivanja. Kod vertikalnih jamskih peći koje se pune odozgo, gašenje/ohlađivanje odvija se vertikalnim tokom plina odozgo na dolje ili obratno. Kod onih koje se pune s vrha, gašenje/ohlađivanje se izvodi preko vertikalnih grafitnih cijevi poredanih u krug unutar komore. Značajka tih cijevi jesu radijalne mlaznice preko kojih se plin za gašenje/ohlađivanje jednoliko dispergira po obradcima. Sustav može dodatno biti opremljen sa rotirajućim stolom na koji se poslaguju dijelovi, a njegova je uloga u smanjenju mogućnosti pojave distorzije prilikom gašenja [16].

## **5.12. Vertikalne peći sa spuštajućim dnom**

Ovaj tip vakuumskih peći 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. Kao i kod vertikalnih jamskih peći, smjer širenja plina može biti radijalan (preko mlaznica postavljenih po obodu komore) ili aksijalno odozgo ili odozdo. Sve ostale karakteristike su vrlo slične kao i kod predhodnog tipa vakuumskih peći. Upotrebljava se dva tipa termoparova, jedan za mjerenje temperature površine obratka, a drugi za detekciju toplinskih zona unutar obratka. Oni povezani u zajedničku upravljačku jedinicu daju točnu informaciju o uvjetima koji vladaju prilikom obrade. Jednolikost temperaturnog polja unutar komore postiže se upotrebom molibdenskih (Mo) ili grafitnih grijača, koji su u mogućnosti u pojedinim situacijama razviti temperature od 1650°C, a grafitni čak do 2000°C. Sustav je također potpuno automatiziran

preko industrijskih PLC računala, koji omogućuju monitoring te regulaciju i snimanje svih operacija koje se izvode [9].



Slika 33. Vertikalna vakuumska peć sa spuštajućim dnom [9]

Na slici 33. je prikazana vertikalna vakuumska peć sa spuštajućim dnom, proizvođača SECO/WARWICK, sa sljedećim karakteristikama [9]:

- Dimenzije vruće komore: 900 x 1800 mm
- Maksimalna temperatura: 1350°C
- Pritisak plina za hlađenje: 10 bar (N<sub>2</sub>, He)

## 6. Zaključak

Pod pojmom „toplinska obrada“ podrazumjeva se svaki onaj postupak u kojem se obradak podvrgava temperaturno-vremenskim ciklusima kako bi u konačnici dobio potrebna mehanička, fizička i kemijska svojstva. Konkretna svojstva koja se u praksi traže su, primjerice: duža trajnost, veća čvrstoća, otpornost na trošenje, otpornost na česte promjene temperature, otpornost na agresivne medije, bolji udarni parametri itd. Budući da je svaka promjena svojstava materijala nekog obradka, beskompromisno, rezultat mikrostrukture, cilj svakog postupka toplinske obrade jest što preciznije upravljanje i kontroliranje iste. Upravo vakuumske peći omogućuju takav, visok, stupanj upravljivosti procesa toplinske obrade. Ujedno, s visokim tehnološkim razvojem, vakuumske peći pružaju mogućnost toplinske obrade uz: značajno manje deformacije i promjene dimenzija, najpogodnije uvjete za automatsko vođenje cijelog procesa, najhumanije radne uvjeti za poslužitelja peći, nemaju otpadnih tvari, metali zadržavaju metalni sjaj i ne oksidiraju, nije potrebno naknadno čišćenje, nema razugličenja površinskog sloja itd. Uklanjanjem zraka iz komore uklanjamo sve izvore onečišćenja i doprinosimo povećanju kvalitete obrađivanog materijala. Vakuumske peći imaju mnogo prednosti i zato su u današnje vrijeme neizostavna oprema u modernoj toplinskoj obradi. Znanstvenici predviđaju da će se tipovi vakuumske peći još više povećati, kao i usavršiti, i da će cijena takvih uređaja pasti što će omogućiti kvalitetniju obradu i kvalitetnije proizvode.

## 7. Literatura

- [1] <http://www.ipsen.de/en/Products/VacuumTechnology.htm>
- [2] F. Cajner, M. Stupnišek: Osnove toplinske obrade, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2001.god.
- [3] [http://en.wikipedia.org/wiki/Vacuum\\_furnace](http://en.wikipedia.org/wiki/Vacuum_furnace)
- [4] George E. Totten: Steel Heat Treatment Handbook, Portland state university, Portland, USA
- [5] [http://www.fsb.hr/zavod\\_za\\_materijale/download/](http://www.fsb.hr/zavod_za_materijale/download/)
- [6] J. Bach, F. Dambacher: Proven technologies and industrial developments in heat treatment and surface engineering of tools and dies, 1<sup>st</sup> Internacional conference on heat treatment and surface engineering of tools and dies, Pula 2005. godine
- [7] <http://www.varianinc.com/cgi-bin/nav?/>
- [8] <http://www.ald-holcroft.com/>
- [9] <http://www.secowarwick.com/vacuum/>
- [10] <http://www.geartechnology.com/>
- [11] [http://www.tecnocentro.it/files/vertical\\_furnace.pdf](http://www.tecnocentro.it/files/vertical_furnace.pdf)
- [12] <http://vacaero.com/>
- [13] <http://www.houghtonintl.com/>
- [14] <http://www.phy.hr/>
- [15] <http://www.bmi-fours.com/>
- [16] <http://www.aichelinusa.com/>
- [17] <http://en.wikipedia.org/wiki/Outgassing>