

PROJEKTOVANJE UREĐAJA ZA TERMIČKU OBRADU ZUPČANIKA**DESIGN OF DEVICES FOR HEAT TREATMENT OF GEARS**Vladimir Radulaški, Branko Škorić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – MAŠINSTVO**

Kratak sadržaj – U radu je objašnjena tehnologija termičke obrade tri tipa zupčanika izrađenih od niskolegirano čelika Č4320 (EN 16MnCr5) i Č4721 (EN 20CrMo5) čija je proizvodnja velikoserijska. Prema zahtevu, data je analiza i usvajanje procesa cementacije, kaljenja i otpuštanja, i problemi koji se mogu javiti pri radu. Definisano je pogon termičke obrade, kao i spisak potrebnih peći i uređaja. Na kraju, dat je toplotni proračun peći za cementaciju i idejno rešenje pogona.

Ključne reči: Tehnologija termičke obrade, zupčanici, proračun peći za cementaciju

Abstract - This paper explains the technology of heat treatment of three types of gears made of low-alloy steel Č4320 (EN 16MnCr5) and Č4721 (EN 20CrMo5) whose production is large series. Based on the requirements, the analysis and adoption of the process of cementation, hardening and tempering and problems that may occur during operation, are given. The heat treatment plant for these gears has been defined, as well as the list of required furnaces and devices. Finally, a thermal calculation of the cementation furnace and the conceptual design of the heat treatment plant plan are given

Keywords: Heat treatment technology, gears, calculation of cementation furnace.

1. UVOD

Zupčasti prenosnici su mašinski elementi koji spadaju u mehaničke prenosnike, kod kojih se obrtni moment sa jednog vratila na drugo, prenosi posredstvom neposrednog kontakta zuba zupčanika. Zbog prirode opterećenja, zupčanici su prvenstveno izloženi savijanju zuba, a veliki je i površinski pritisak. Ovi uslovi vremenom dovode do oštećenja i otkazivanja rada zupčanika. Zbog toga je neophodno uraditi termičku obradu, koja doprinosi povećanju mehaničkih karakteristika.

2. ANALIZA PROBLEMATIKE TERMIČKE OBRADU ZUPČANIKA

Savijanje zupčanika je najintenzivnije u korenu zuba, pri čemu se bokovi vremenom habaju, što dovodi do stanjivanja zupca, smanjivanja čvrstoće i rasta zazora između njih. Kako zazor vremenom raste, dolazi do promenljivog i povećanja udarnog opterećenja.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Branko Škorić, red. prof.

Na kraju može doći do zamora materijala koji nastaje zbog učestalih savijanja. Na slici 1, prikazan je raspored koncentracije napona kod zuba zupčanika.



Slika 1. Prikaz koncentracije napona u zubu [1]

Ta mesta su u tački bokova zuba, koja je posledica površinskog napona pri dodiru bokova zuba i u korenu koja je posledica savojnog dinamičkog opterećenja. Zbog toga najčešće posledice mogu biti: lom zuba koji je posledica zamora od savijanja, piting (ljuštenje) koje je posledica zamora od kontaktnog opterećenja i habanje površine zbog prisustva klizanja.

3. ANALIZA MATERIJALA I PROIZVODNI PROGRAM

Za izradu zupčanika koriste se žilavi materijali sa velikom tvrdoćom otpornom na habanje. To su najčešće čelici za cementaciju (žilavo jezgro i tvrda površina). U tabeli 1, dat je proizvodni program.

Tabela 1. Proizvodni program

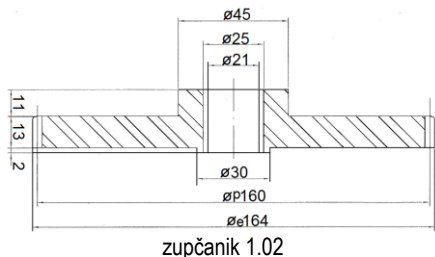
Naziv dela	Materijal	Težina [kg]	Kapacitet [kom/god]
Zupčanik 1.01	Č4320	0,051	900 000
Zupčanik 1.02	Č4320	1,18	90 000
Zupčanik 1.03	Č4721	0,37	300 000

Zahtevi za termičku obradu ovih zupčanika su sledeći: zupčanici 1.01 i 1.03: dubina cementiranog sloja (dc) 0,5 – 0,7 mm i kaljenje na 58 ± 2 HRC; zupčanik 1.02: dc 0,4 – 0,6 mm i kaljenje na 60 ± 2 HRC.

Čelici Č4320 i Č4721 su niskolegirani čelici za cementaciju sa određenim sadržajem C, Si, Mn, Mo, Cr, P i S, koji daju otpornost na povišenim temperaturama, otpornost protiv kiselina, baza i soli, otpornost protiv habanja, visoku žilavost, krtost pri mehaničkoj obradi, nemagnetičnost, visoku tvrdoću u kaljenom stanju i dr.

4. TEHNOLOGIJA TERMIČKE OBRADE ZUPČANIKA

Izgled najvećeg zupčanika iz proizvodnog programa, sa dimenzijama, prikazan je na slici 2.



Slika 2. Izgled zupčanika iz proizvodnog programa

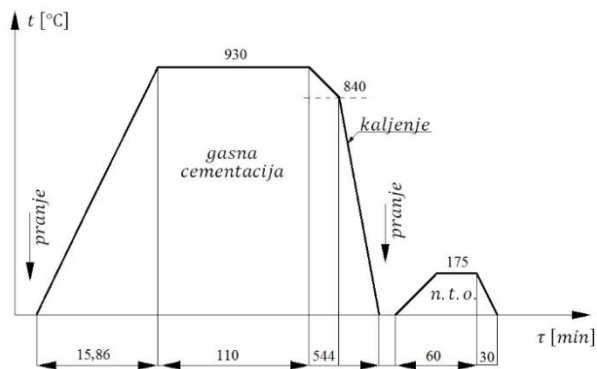
Zupčanici su vrlo malih dimenzija. Tehnologija njihove termičke obrade zahteva cementaciju, kaljenje i niskotemperaturno otpuštanje sa razlikom u vremenima zagrevanja, zadržavanja i hlađenja. Ova vremena data su u tabeli 2.

Tabela 2. Vremena termičke obrade zupčanika u komori za cementaciju

Naziv dela	Vreme zagrevanja [min.]	Vreme zadržavanja [min.]	Vreme hlađenja [min.]
Zupčanik 1.01	11,76	140	522
Zupčanik 1.02	15,86	110	544
Zupčanik 1.03	10,62	160	539

Parametri niskotemperaturnog otpuštanja za sva tri zupčanika su isti (zagrevanje i zadržavanje 1h, hlađenje 30 min.). Temperatura zadržavanja je 175 °C.

Na slici 3, prikazan je grafikon termičke obrade zupčanika 1.02 koji je ujedno i najveći.



Slika 3. Grafikon termičke obrade zupčanika 1.02

Zagrevanje šarže, započinje kada se komora peći za cementaciju zagreje na 930 °C. Ukupno vreme zagrevanja komada je vreme potrebno da se zagreje jezgro. Vreme zadržavanja na temperaturu cementacije se određuje iskustveno na osnovu dijagrama zavisnosti dubine cementacije, vremena cementacije i temperature. Ukupno vreme zagrevanja komada na temperature cementacije je:

$$\tau_{uk} = \frac{F_{oj} \cdot c \cdot \rho \cdot X^2}{\lambda} [min.], \quad (1)$$

gde su:

- F_{oj} – Furijeov broj koji se dobija na osnovu dijagrama temperaturne funkcije za centar neograničene ploč;
- c – specifična toplota materijala,
- ρ – gustina materijala,
- X – karakteristična dimenzija zupčanika, (najmanja dimenzija u najvećem preseku);
- λ – koeficijent toplotne provodljivosti.

Nakon zadržavanja na temperaturi cementacije, sledi hlađenje šarže na početnu temperaturu kaljenja od 840 °C u komori za cementaciju. Temperaturu usvajamo u zavisnosti od procenta ugljenika iz $F_e - F_{e3}C$ dijagrama. S obzirom na veliku izolaciju peći i prostor komore koji je malo veći od najveće šarže, hlađenje se odvija dosta sporo sa brzinom od oko $10 \frac{°C}{h}$. Ovi parametri određuju vremena hlađenja šarže od oko 8 h.

U tabeli 3, prikazane su optimalne temperature termičke obrade čelika Č4320 i Č4721

Tabela 3. Optimalne temperature TO Č4320 i Č4721 [2]

Materijal [JUS]	Cementacija [°C]	Obično kaljenje [°C]	Otpuštanje [°C]
Č4320	870-900	810-830	175-200
Č4721	840-870	820-840	140-160

S obzirom da su komadi slične veličine i kako se ne bi čekalo na snižavanje temperature za Č4721, a pri tome zahtevi ostaju zadovoljeni, temperature kaljenja za oba materijala ostaju iste, 840 °C, kao na slici 3.

5. IZBOR I PRORAČUN OPREME ZA POGON TERMIČKE OBRADE

Najvažniji uređaj u pogonu termičke obrade je peć. S obzirom da se radi o termičkoj obradi zupčanika manjih dimenzija koji su izrađeni od čelika za cementaciju, ali sa većim brojem komada u šarži i dužem vremenu hlađenja sa temperature cementacije biće potrebno usvojiti više linija za cementaciju. Linija za cementaciju se sastoji od sledećih uređaja: peć za cementaciju sa kontrolisanom aktivnom atmosferom, peć za niskotemperaturno otpuštanje, gasogenerator za proizvodnju endoatmosfere, uređaj za šaržiranje, uređaj za pranje i sušenje, komandni orman za upravljanje procesom. Za termičku obradu zupčanika, izabrana je Case Master Sealed Quench peć, čija je nosivost tereta 400 kg (slika 4).



Slika 4. Peć za cementaciju i kaljenje Case Master Sealed Quench AFS/AFC 5 [3]

Peć se sastoji iz dve komore namenjene za cementaciju i kaljenje predmetnih delova. Gabaritne dimenzije peći su 2,5 x 3 x 3,5 m. Dimenzije korisnog prostora za smeštaj šarže su 0,61 x 0,61 x 0,91 m. Maksimalna nominalna temperatura je do 1000 °C. Maksimalna snaga zagrevanja, ako se koristi električna struja iznosi 72kW.

Za sva tri tipa zupčanika iz proizvodnog programa, koristi se peć za niskotemperaturno otpuštanje – tip BREN (slika 5). Usvojene gabaritne dimenzije peći su 1 x 2 x 2,5 m.

Dimenzije korisnog prostora za smeštaj šarže su $0,61 \times 0,61 \times 0,91 \text{ m}$. Kod ove peći veoma je bitna cirkulacija atmosfere.

Ona treba da je što bolja kako bi se osigurala uniformnost temperaturnog polja unutar šarže.



Slika 5. Peć za NTO – tip Bren [3]

Gas koji se koristi za process, može da bude prirodan gas ili propan. Radna temperature je $1050 \text{ }^\circ\text{C}$, a za hlađenje se koristi atmosferski system vodenog hlađenja. Na slici 6 je prikazan generator za proizvodnju endogasa – tip G 60E.



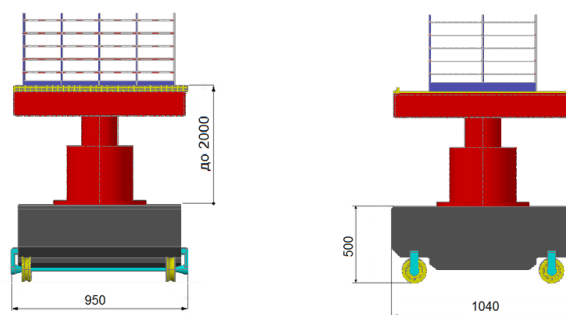
Slika 6. Endogenerator G-60E [4]

Nosač šaržera ima ulogu da obezbedi snabdevanje svih uređaja šaržom u pogonu termičke obrade. Vodi se automatski prema propisanom programu koji se donosi u zavisnosti od potrebnih vremena koje šarža provede na određenom uređaju, tj. od vremena trajanja proizvodnog ciklusa. Sto za šaržiranje i dešaržiranje predstavlja jedan od elemenata koji se nalazi na samom nosaču i ima mogućnost vertikalnog pozicioniranja do 2 m , kao i mogućnost okretanja stola za 360 ° .

Na stolu nosača se nalaze valjčići koji omogućuju pomeranje šarže ka peći. Za ovaj pogon, projektovan je specijalan nosač šaržera čiji su izgled i gabaritne dimenzije date na slici 7.

Pošto termička obrada spada uglavnom među poslednje postupke u procesu stvaranja nekog proizvoda, deo koji ulazi u pogon je uglavnom zaprljan nečistoćama od prethodne obrade. Stoga, jedan od neizostavnih uređaja u pogonu termičke obrade je uređaj za paranje i sušenje. Pranje i sušenje dela je bitno i pre i posle obrade.

Pre obrade je bitno kako bi se komad očistio i bio spreman za termički proces, naročito kod cementacije gde atomi ugljenika prodiru u komad, tako da je potrebno da komad bude što čistiji, a posle termičke obrade, naročito ako se radi kaljenje u ulju, komad je opet zamašćen, pa je potrebno da se opet očisti i osuši. Iz kataloga SECO WARWICK, usvojen je uređaj za pranje i sušenje sa dve komore. Prikazan je na slici 8.



Slika 7. Nosač šaržera sa šaržom



Slika 8. Uređaj za pranje i sušenje WSD tip [3]

Dimenzije uređaja su usvojene i iznose $1,5 \times 1,5 \times 2,5 \text{ m}$. Pogon termičke obrade radiće u tri smene. Zbog nemogućnosti stopostotnog iskorišćenja uređaja u pogonu, usvojeno je da je stepen iskorišćenja $\eta = 0,8$. Efektivni kapacitet opreme, računa se prema obrascu:

$$K_e = m_e \cdot S_e \cdot n_k \cdot \eta = 309888 \frac{\text{min.}}{\text{god.}} \quad (2)$$

gde su:

$$m_e = 269 - \text{br. radnih dana u godini;}$$

$$S_e = 3 - \text{br. smena u danu;}$$

$$n_k = 8 - \text{br. radnih sati u smeni.}$$

Potrebna broj jedinica opreme je:

$$M_i = \frac{T_i}{K_e} \quad (3)$$

Za svaku poziciju, vreme zadržavanja šarže na uređaju T_i se može odrediti iz tehnološke karte proizvoda. Potrebna broj šarži na godišnjem nivou sa dimenzijama korisnog prostora od $0,61 \times 0,61 \times 0,91 \text{ m}$, dat je u tabeli 5.

Tabela 5. Potrebna broj šarži

Naziv dela	Komada u šarži	Težina šarže [kg]	Broj šarži godišnje
Zupčanik 1.01	560	31,56	1608
Zupčanik 1.02	90	117,2	1000
Zupčanik 1.03	240	97,8	1250

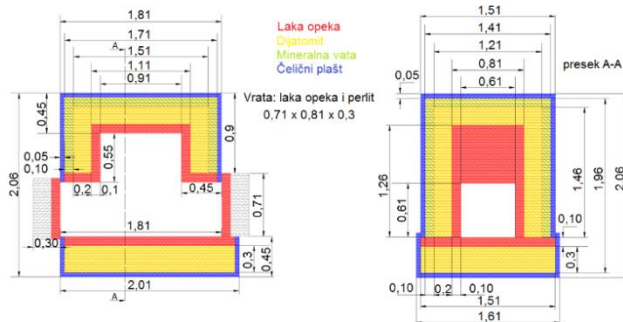
Kompletna operacija prebacivanja šarže iz peći u neki drugi uređaj može obaviti za približno 5 min . Stoga se za svaku šaržu troši ukupno 20 min . u toku celog ciklusa termičke obrade za procese horizontalnog transporta koji se vrši uz pomoć nosača šarže. Iz proračuna se dobija da je potreban jedan nosač šarže, ali sa obzirom na plan pogona i dve transportne šine sa obe strane peći, usvajaju se dva nosača. Ukupni bilans opreme dat je u tabeli 6.

Tabela 6. Bilans potrebne opreme.

Br.	Naziv uređaja	Broj uređaja Izračunat/usvojen
1	Peć za cementaciju	8,52/9
2	Uređaj za pranje i sušenje	0,56/1
3	Peć za niskotemperaturno otpuštanje	0,74/1
4	Uređaj za šaržiranje	0,24/2

6. PRORAČUN TOPLOTNIH GUBITAKA KOMORE ZA CEMENTACIJU I SNAGE PEĆI

Kako bi se mogao izvršiti proračun snage peći potrebne za zagrevanje komada (korisna snaga) i snage peći potrebne za zagrevanje šarže u komori za cementaciju, potrebno je proračunati toplotne gubitke i toplotu akumulisanu u komadima. Mere izolacionih slojeva, dati su na slici 9.



Slika 9. Dimenzije izolacionih slojeva peći

Vatrootporni sloj je od lake opeke debljine 100 mm. Toploizolacioni sloj se sastoji od 200 mm dijamomita i 100 mm mineralne vate. Pod peći je odvojen od bočnih zidova i sastoji se od lake opeke debljine 100 mm i dijamomita debljine 300 mm. Ukupni toplotni gubici u komori za cementaciju, su suma toplotnih gubitaka kroz bočne zidove, plafon, prednji-zadnji zid, pod, ulazna i izlazna vrata komore za cementaciju i kroz vratilo ventilatora, koji služi za ravnomernu cirkulaciju atmosfere. Ukupni toplotni gubitak će tada biti:

$$q_g = k \cdot (2 \cdot q_{g,b,z} + q_{g,p} + 2 \cdot q_{g,p/z} + A) \quad (4)$$

gde je:

$k = 1,2$ – stepen sigurnosti zbog starenja izolacije,

A – suma $q_{g,pod}$, $q_{g,uv}$, $q_{g,iv}$, $q_{g,v}$

U tabeli 7, dati su pojedinačni i ukupni toplotni gubitak.

Tabela 7. Toplotni gubici komore za cementaciju

Toplotni gubici, q_g [W]						
$q_{g,b,z}$	$q_{g,p}$	$q_{g,p/z}$	$q_{g,pod}$	$q_{g,uv}$	$q_{g,iv}$	$q_{g,v}$
915,8	666,7	393,7	1607,7	260,6	247,8	34,8
Ukupno: 6227						

Proračun korisne snage peći je rađen za najtežu šaržu, zupčanika 1.02. Korisna snaga peći je:

$$P_k = \frac{Q_k}{\tau_z + \tau_{drž.}} = \frac{6,73 \cdot 10^7}{(16 + 110) \cdot 60} = 8902,11 \text{ W} \quad (5)$$

gde su:

τ_z ; $\tau_{drž.}$ – vremena zagrevanja i zadržavanja na temperaturu cemetacije, [min.],

Q_k – korisna topota, toplota koju prihvate komadi da bi se zagrejali na 930 °C, [J] koja se dobija iz:

$$Q_{ak.kom} = 90 \cdot G_{kom} \cdot c_{kom} \cdot t_{sr.kom} = 6,73 \cdot 10^7 \text{ J} \quad (6)$$

gde su:

$G_{kom} = 106,2 \text{ kg}$ – masa zupčanika 1.02 u šarži,

$c_{kom} = 693 \text{ [J/kg}^\circ\text{C]}$ – specifična topota komada,

$t_{sr.kom} = 915,03 \text{ }^\circ\text{C}$ – srednja temperatura komada.

Snaga peći potrebna za period zagrevanja je:

$$P_{pe} = \frac{P_k}{\eta_T} = \frac{8902,11}{0,260} = 34,23 \text{ kW}$$

gde je: η_T – stepen toplotne efektivnosti.

Pošto je $34,23 \text{ kW} < 72 \text{ kW}$ (iz kataloga), peć *Case Master Sealed Quench* **ZADOVOLJAVA**.

7. ZAKLJUČAK

U ovom radu bile su pokazane najvažnije tačke pri projektovanju pogona termičke obrade za izradu zupčanika malih dimenzija od niskolegiranog čelika, koji se izrađuju u velikoj seriji. Pokazano je koji su polazni parametri i zahtevi na osnovu kojih se ušlo u proračun i izbor neophodne opreme. U radu je primećeno veliko vreme hlađenja šarže koje se dobilo zbog veoma velike izolacije peći. Korigovanje odgovarajućih faktora uslovalo bi optimalno rešenje sa smanjenjem troškova uz zadržavanje proizvodnosti. Takođe je moglo i da se usvoji manji broj peći za cementaciju i kaljenje ali sa većim korisnim prostorom za smeštaj šarže. Ovaj izbor od više peći bi mogao fleksibilnije da se ponaša pri promeni programa.

8. LITERATURA

- [1] Đukić, M. [1987] *Projektovanje pogona za termičku obradu zupčanika*, (Novi Sad, Fakultet Tehničkih Nauka, Diplomski rad).
- [2] Dojčinović, M. [1963] *Tablice za metalce* (Beograd, Izdavačko preduzeće "Rad").
- [3] <https://www.secowarwick.com/wp-content/uploads/2017/03/ATM-Case-Master6.pdf>
- [4] <https://www.secowarwick.com/wp-content/uploads/2017/03/ATM-Generator2.pdf>

Kratka biografija



Vladimir Radulaški rođen je u Bečeju 1984.god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu iz oblasti tehnologije termičke obrade odbranio je 2022.god. kontakt: vladimirradulaski984@gmail.com

Dr Branko Škorić, redovni profesor na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, rođen 1955. god. Doktorirao iz oblasti inženjerstva površina i nanotehnologija.