

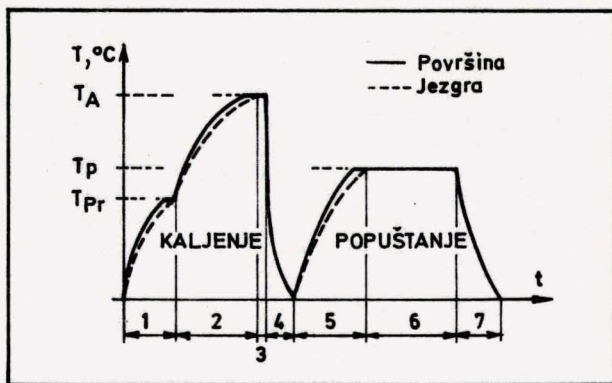
Tačnija realizacija temperaturnog režima pri termičkoj obradi metala

Dr Miloje Kostić, dipl. inž., Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd

Eksperimentalna istraživanja su potvrdila pretpostavku da se trenutak progrijanosti šarže, pri termičkoj obradi metala, može identifikovati sa ciklusom grejanja, počev od koga se srednja snaga tog i narednog ciklusa praktično ne razlikuju. Kod komornih peći sa regulacijom "on-off", ta razlika se određuje na osnovu razlika trajanja perioda uključenosti u dva susedna ciklusa grejanja. Šarža je zadovoljavajuće progrijana kada ta razlika postane manja od neke utvrđene vrednosti koja zavisi od težine šarže. Realizovani elektronski instrumenat na osnovu dostizanja zadate razlike vremena uključenosti, registruje trenutak od kog se šarža smatra pregrijanom. Za sada on služi za automatizaciju eksperimentalnih istraživanja. Cilj je da se instrumenat, u sledećoj fazi, koristi za eksperimentalno uvođenje ovog postupka u praksu.

1. Uvod

Tačnost projektovanja i preciznost realizacije parametara procesa termičke obrade bitno su poboljšani, korišćenjem kompjutera u fazi projektovanja i u fazi vođenja tehnološkog procesa. Posebno je važno realizovati zadati temperaturno-



Slika 1. Faze procesa poboljšanja u T-t dijagramu; 1 - predgrevanje, 2 - zagrevanje i progrevanje, 3 - držanje za homogenizaciju strukture (1 + 2 + 3 - austenitizacija), 4 - gašenje, 5 - grejanje i progrevanje na temperaturi popuštanja, 6 - držanje na T_p , 7 - hlađenje po popuštanju

-vremenski režim zagrevanja šarže. Za jedan tipičan proces termičke obrade, poboljšanje (kaljenje + popuštanje), zadati temperaturni režim je prikazan na slici 1. Projektovanje temperaturnog režima šarže je tačnije ukoliko kompjuterski program uzima u obzir veći broj relevantnih ulaznih podataka. To su podaci:

- o vrsti materijala (temperaturi kaljenja, vremenu homogenizacije);
- o obliku i dimenzijama komada šarže, broju komada šarže i
- o karakteristikama opreme za realizaciju termičke obrade.

Odgovarajući potprogrami predviđaju uvođenje velikog broja ulaznih podataka na osnovu kojih se precizira temperaturni režim. Temperature predgrevanja (T_{pr}), austenitizacija (T_A) i popuštanja materijala. Najteže je odrediti završetak progrevanja šarže (slika 1). Po pravilu se vremena zagrevanja i progrevanja određuju uz pomoć kompjutera, korišćenjem teorijskih izraza prenosa toplote za cilindar i ploču, ili empirijskih izraza za određivanje traženog vremena. U oba slučaja su potrebni znatna dorada i prilagođavanje konkretnim uslovima.

Prvi postupak se koristi ako su u pitanju pojedinačne šarže pravilnog oblika. Ali i tada se proračun ne može vršiti direktno po teorijskim izrazima, jer i najveći broj šarži u obliku paralelopipeda i cilindra ne ispunjava uslove da se mogu, za proračun, smatrati neograničeno dugim. U novije vreme razvijeni su programi za proračun zagrevanja paralelopipeda i cilindra konačnih dimenzija. Ti proračuni su složeni [2], a uz to i nepogodni za praksu, ako oblik tela odstupa od pomenutih pravilnih oblika. Za proračun vremena zagrevanja i progrevanja šarže, bitno je tačno definisati uslove koji karakterišu razmenu toplote šarže i radnog prostora peći. U toku procesa zagrevanja ti (granični) uslovi se menjaju. Zato je potrebno svaki režim zagrevanja razložiti na pojedine periode zagrevanja, koji se opisuju odgovarajućim graničnim uslovima. Greške u modelovanju temperaturnih režima proizvode grešku u određivanju vremena zagrevanja šarže. Ta greška se kumulativno iskazuje u određivanju trenutka progrijanosti šarže [1].

Empirijski izrazi se sve više koriste za proračun vremena zagrevanja i progrevanja šarže. Najčešće se radi o opštim izrazima, koji kvalitativno opisuju proces zagrevanja, oblika kao u (1) [5]:

$$t = a \times \frac{m}{A} + b \quad (1)$$

gde su:

- t - traženo vreme grejanja i progrevanja [min],
- m - masa predmeta u [kg],
- A - spoljna površina predmeta u [m²].

Koeficijenti "a" i "b" zavise od konkretnih uslova grejanja. Ti uslovi su definisani početnom temperaturom šarže (T_{po}) i konačnom temperaturom šarže po progrevanju po celom preseku (T_{kon}). Pritom se smatra da je temperatura peći $T_{peći} = T_{kon}$.

Iako proračun vremena progrevanja po izrazu (1), predložen u [6], predstavlja znatnu pomoć, brojne teškoće ostaju i dalje:

- postupak je proveren za pojedinačne komade i ne može se koristiti za šarže od velikog broja komada;
- neophodnost da se koeficijenti "a" i "b" odrede za datu opremu (peć) i
- potreba za velikim brojem merenja u cilju utvrđivanja "a" i "b" za veliki broj kombinacija temperature T_{po} i $T_{kon} = T_{peći}$.

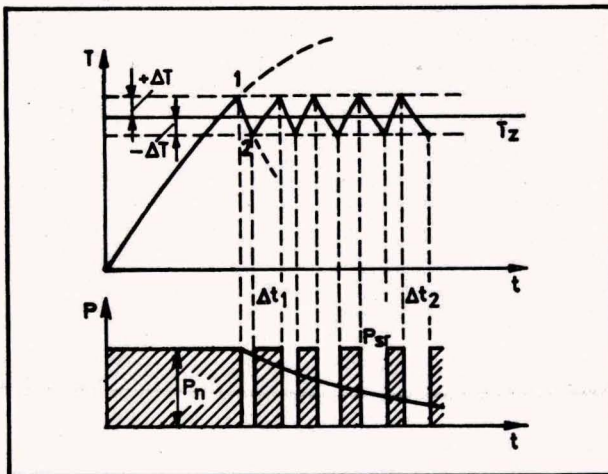
To nije sve. Temperatura peći u trenutku ubacivanja šarže u peć (T_{po}) opadne, $T_{po} < T_p = T_{kon}$, a to sa svoje strane utiče na vremena grejanja i progrevanja. Trajanje progrevanja šarže zavisi od više karakteristika oblika šarže i ne može biti potpuno karakterisano odnosom m/A u (1).

I uz savladavanje pobrojanih teškoća, nijedan od dva navedena postupka nije direktno primenljiv u slučajevima šarži sa velikim brojem komada. Problem se rešava tako što se, na primer, za proračun zagrevanja:

- šarža od niza cilindričnih delova na podu peći modeluje sa pločom čija je debljina jednaka visini cilindra, a
- šarža od u snop povezanih cilindara zamenjuje ekvivalentnim cilindrom, čiji je prečnik ravan prečniku snopa.

U oba slučaja se javlja problem tačnog određivanja karakteristika ekvivalentne šarže. Pri izračunavanju srednje gustine ploče i cilindra, treba uračunati šupljine. Naročito je izražen problem određivanja koeficijenta toplotne provodnosti - on je znatno manji u odnosu na kompaktnu ploču i cilindar. Npr. ako se "ploča" sastoji od velikog broja metalnih listova, koeficijent toplotne provodnosti u pravcu normale na površini listova je smanjen za 5-15 puta, u zavisnosti od stepena rileganja listova, kvaliteta površine i drugih faktora [1].

Očigledna je potreba da se dođe do tačnijeg i lakšeg postupka za realizovanje zadatog temperaturnog režima šarže. Posebno je važno tačno registrovanje trenutka nastupanja pregrevanosti šarže po celom preseku, odnosno završetka procesa austenitizacije (slika 1). U radu na ovom problemu, kod elektrootpornih peći sa tzv. regulacijom temperature "on-off", autor je došao na ideju koju je proverio na većem broju primera i dobio ohrabrujuće rezultate. Strateško istraživačko-tehnološki projekat koji je definisan na osnovu ove



Slika 2. Idealizovani prikaz promena u peći sa dvopoložajnim regulatorom temperature

ideje, je odobren za finansiranje iz fonda za tehnološki razvoj. Rezultati dobijeni u toku prve faze istraživanja, u 1991. godini, su opravdali autorova očekivanja, pa se zajedno sa idejom saopštavaju u ovom radu.

2. Temperaturno-vremenski režimi peći sa regulacijom "on-off"

U elektrootpornim pećima se najčešće primenjuje diskretan metod regulisanja u prostom obliku - dvopoziciono regulisanje. Pri takvom regulisanju u svojstvu izvršnog organa, koristi se komutaciona aparatura (elektromagnetni kontaktori ili tiristori prekidači), koja omogućava periodično uključivanje ili isključenje peći. Uključenje izaziva rast temperature (slika 2), pošto se snaga peći uvek projektuje sa određenom rezervom. Pri normalnoj snazi, stacionarna temperatura bi bila znatno veća od radne temperature peći.

Na slici 2a je prikazana zavisnost temperature od vremena, a na slici 2b zavisnost snage. U periodu zagrevanja, snaga je maksimalna (instalirana snaga peći), pa temperatura raste do tačke 1 kada dostigne vrednost $T_z + \Delta T$ ($2\Delta T$ - zona neosetljivosti regulatora). U tom trenutku regulator isključi, kontaktor prekida napajanje i snaga peći pada na nulu. Temperatura peći počinje da opada po eksponencijalnoj krivoj 1-2, do donje granice neosetljivosti regulatora ($T_z - \Delta T$). U tom trenutku dolazi do novog uključivanja peći i njena temperatura počinje da raste.

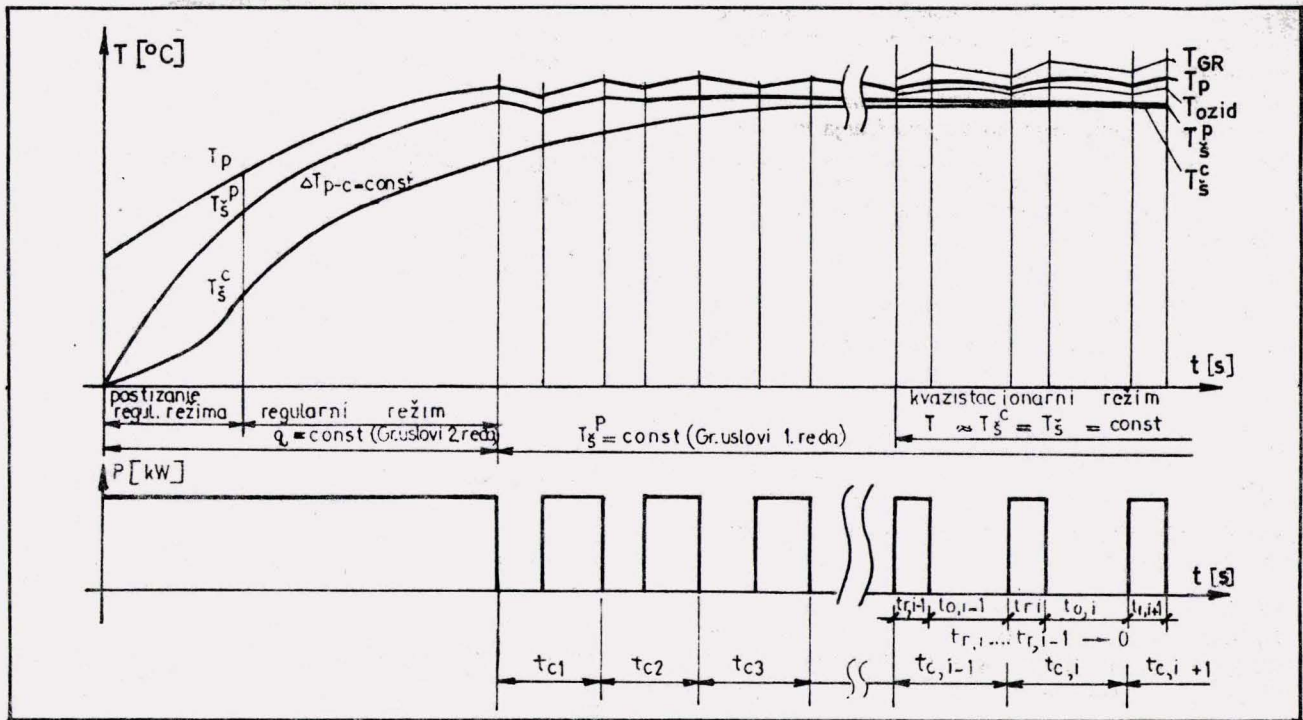
Tako se regulisanjem temperature dvopoložajnim regulatorom dobija "testerasta kriva" koja osciluje oko temperature peći u granicama neosetljivosti regulatora. Pritom srednja snaga zavisi od odnosa intervala uključenosti Δt_1 i intervala isključenosti Δt_2 . Sa daljim progrevanjem šarže i peći, kriva zagrevanja postaje sve strmija, a kriva hlađenja sve položnija. Odnos intervala Δt_1 i Δt_2 se smanjuje, a srednja snaga šarže P_{sr} opada. Pri dvopozicionom regulisanju srednja snaga zavisi od zadate temperature peći koja se održava.

3. Ideja i razrada postupka za određivanje trenutka progrevanosti šarže

Periodom progrevanja šarže po celom preseku, pri stalnoj temperaturi površine šarže, završava se proces zagrevanja šarže u pećima za termičku obradu, pa je tačno određivanje završetka progrevanja šarže od najveće važnosti. Ali je to povezano sa znatnim teškoćama. Temperaturno-vremenski režimi zagrevanja peći (T_p), površine šarže (T_s^p) i središta šarže (T_s^c) u komornoj peći sa regulacijom "on-off" su prikazani na slici 3.

U praksi se praćenje i merenje temperaturnih režima sprovodi mernim sistemima za merenje i regulisanje temperature. U najjednostavnijem slučaju, taj sistem sadrži davač temperature (termopar) i merni instrument (termoregulator). Problem je u tome šta meri termopar, postavljen na uobičajeni način u radni prostor peći. To nije temperatura šarže, a najčešće odstupa i od tzv. temperature peći, kako se ona definiše u teoriji zagrevanja peći. Zadatu temperaturu prvo dostiže peć i pokazivanja na instrumentu se dalje ne menjaju. Potom površina šarže, pa tek kasnije i središte šarže, dostiže zadatu temperaturu, ali se to na osnovu pokazivanja termoregulatora ne može registrovati. To je jedino moguće ako bi vrh termopara ubacili u središte šarže, sto je u praksi često nemoguće, ili bar neracionalno za većinu procesa.

Problem se rešava tako što se pribegava proračunu ukupnog trajanja zagrevanja šarže (t). Pri proračunu to vreme se najčešće deli na dva intervala $t = t_1 + t_2$. Vreme t_1 odgovara trajanju zagrevanja u režimu sa stalnim toplotnim fluksom, $q_p = \text{const}$ (granični uslov 2. reda). Vreme t_2 počinje po okončavanju perioda t_1 i traje do završetka progrevanja



Slika 3. Temperaturni režimi zagrevanja šarže u elektrootpornim jamskim i komornim pećima; T_p – temperatura peći, T_{ps} – temperatura površine šarže, T_g – temperatura grejača, T_{ozid} – temperatura ozida, $T_{c,i}$ – trajanje ciklusa u peći sa regulacijom "on-off", $t_{r,i}$ (ili t_i) – period uključenosti (rada) u i -tom ciklusu

šarže. Zavisno od masivnosti šarže, ali i od autora [1], vreme t_2 se različito proračunava. Jedni uzimaju da se u intervalu vremena t_2 zagrevanje vrši pri stalnoj temperaturi peći, $T_p = \text{const}$ (granični uslov 3. reda), a drugi da se grejanje odigrava pri stalnoj temperaturi površine šarže, $T_s^p = \text{const}$ (granični uslov 1. reda). U stvarnosti se u intervalu vremena t_2 , po pravilu, prvo vrši zagrevanje pri $T_p = \text{const}$, zatim površina šarže dostiže zadatu temperaturu i grejanje nastavlja pri $T_s^p = \text{const}$ (slika 3). Pored neadekvatnog modelovanja režima, model ne može u potpunosti uzeti u obzir:

- uticaj šarže (oblik komada, broj, strukturu i konfiguraciju komada šarže);
- uticaj peći (način prenosa toplote, uslovi prenosa toplote na šaržu) i
- potrebu za akumulacijom energije od strane pojedinih delova peći.

Ovo zadnje otpada ukoliko peć radi toliko dugo da su svi delovi peći zagrejani na odgovarajuće stacionarne temperature. Ukoliko to nije slučaj, deo energije koju peć akumulira zavisi od relativnih temperatura peći, toplotnog kapaciteta i snage peći. Za datu peć, relativna zagrejanost pojedinih delova peći raste ukoliko ona radi duže, ali na nju utiče i stepen pothladivanja peći pri vađenju jedne i stavljanju druge šarže u nju. To znači da ukupno vreme zagrevanja (t) može biti različito samo iz tog razloga iako su svi drugi uslovi isti za dve šarže. Isto tako, srednja snaga koju traži peć po progrevanju šarže na istu temperaturu (slika 2) može biti različita ako se javlja akumulacija energije zbog toga što pojedini delovi peći nisu dostigli stacionarne temperature.

Zbog svega navedenog proračun vremena zagrevanja je nemoguć. Čak i preslikavanje podataka iz identičnog režima može izazvati grešku ako se bilo koji od uslova promeni. Ali tu pomaže uočena činjenica da se srednja snaga komorne

peći sa regulacijom "on-off" po dostizanju zadate temperature po celoj unutrašnjosti šarže, u po dva susedna ciklusa grejanja ne razlikuje. Na to praktično nema uticaja ni to ako svi delovi peći nisu dostigli odgovarajuće stacionarne temperature. Razlike u energiji koju akumulira peć u dva susedna ciklusa su male, jer je vremenska konstanta zagrevanja peći relativno velika. To znači da se nastupanje progrevanosti šarže poklapa sa početkom potpunog podudaranja ciklusa grejanja. Od tog ciklusa razlika trajanja uključenosti (ili isključenosti) peći u dva susedna ciklusa je jednaka nuli. Teorijski se to dostiže posle beskonačno dugog grejanja.

U praksi se uzima da je šarža dovoljno progrevana ako je pomenuta razlika u trajanju perioda uključenosti peći dva susedna ciklusa (" i " i " $i+1$ " ciklusa) dovoljno mala:

$$t_i - t_{i+1} \leq A \quad (2)$$

Vrednost za A je veća što je šarža teža. Na vrednosti izmerenih vremena, t_i i t_{i+1} , utiču i slučajni poremećaji kao i greške u sistemu šarža-peć-merni sistem. Eksperimenti pokazuju da je ta greška ≤ 3 s. o znači da se kriterijum (2) može koristiti za šarže koje su dovoljno progrevane već pri $A \geq 3-5$ s.

4. Eksperimentalna istraživanja

Sva dosadašnja istraživanja su obavljena na jamskoj peći snage 45 kW i dozvoljene temperature 1 000 °C.

Eksperimentalnim istraživanjima je utvrđena mogućnost identifikovanja približavanja kvazistacionarnom energetskom režimu na osnovu konvergencije razlika vremena uključenosti $t_{r,i} - t_{r,i-1}$. Šarža je sigurno progrevana kada pomenuta razlika postane 3–5 s, u slučaju datih peći snage 40–60 kW, ukoliko je težina šarže iznad 50 kg (primer 1). Za šarže ispod 10 kg težine ovaj postupak je nesiguran (primer 2).

Mogućnost da se na ovaj način registruje trenutak (ciklus) progrevanja samo dovoljno velikih šarži ne umanjuje značaj predloženog postupka jer su to za praksu najinteresantniji slučajevi. Eksperimentalna istraživanja u cilju određivanja progrevanosti šarže u peći sa regulacijom "on-off" pokazala su znatnu podudarnost sa praksom u slučajevima standardnih šarži, kada i tehnolozi to tačno određuju.

Posebno je značajno što je u pojedinim slučajevima nestandardnih šarži ovim postupkom povećana tačnost korigovanjem procena tehnologa:

- čelična ploča dimenzija 700 × 700 × 53 mm (težine 200 kg) brže se progreje nego što su predviđanja tehnologa (primer 3);
- obrnuto, vreme za progrevanje šarže od velikog broja komada je često kraće u proračunima tehnologa, što se odražava na kvalitet procesa.

Primer 1.

- Termički postupak: poboljšanje na 860 °C, šarže od raznovrsnih komada ukupne težine oko 100 kg.

$t_{r,i}$ (a' b'")	6'15"	5'32"	4'57"	4'35"	4'25"	4'15"	4'13"
t_0 (a' b'")	4'40"	5'38"	6'12"	6'40"	7'10"	7'17"	7'27"
Broj ciklusa	1	2	3	4	5	6	7

Primerba: šarža je progrevana posle četvrtog ciklusa, odnosno već pri $t_i - t_{i-1} < 10$ s.

Primer 2.

- Termički postupak: poboljšanje na 800 °C šarže od velikog broja malih komada ukupne težine 10 kg.
- Druga šarža u prvoj smeni.

$t_{r,i}$ (a' b'")	5'40"	5'27"	5'24"	5'22"	5'23"	5'25"	5'27"	5'25"
t_0 (a' b'")	6'08"	6'10"	6'13"	6'06"	6'07"	6'10"	6'12"	6'10"
Broj ciklusa	1	2	3	4	5	6	7	8

Šarža se mogla smatrati progrevanom posle 3-4 ciklusa. Oscilovanje vremena t_r , čak i rast do 3 s, umesto logičnog monotonog opadanja je posledica moguće male greške mernog sistema i slučajnih poremećaja (oscilacija napona napajanja i sl.).

Primer 3.

- Termički postupak: poboljšanje na 860 °C ploče dimenzija 700 × 700 × 53 mm, težine oko 200 kg.

$t_{r,i}$ (a' b'")	9'23"	6'25"	6'08"	5'58"	5'48"	5'37"	5'43"	5'41"	5'42"
t_0 (a' b'")	4'47"	5'35"	5'47"	5'52"	6'00"	6'07"	6'06"	6'08"	6'08"
Broj ciklusa	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Primerbe: šarža se može smatrati progrevanom posle četvrtog ciklusa, s obzirom na $Q = 200$ kg i $t_{r,i} - t_r < 10$ s.

Primitne su, s obzirom na masu šarže:

- 1 - povećane vrednosti t u 1. i 2. ciklusu - znatna akumulacija energije,
- 2 - brza konvergencija $t_{r,i}$ i brzo progrevanje šarže, pa se ciklus može skratiti.

5. Zaključak

Ekperimentalna istraživanja su potvrdila pretpostavku da se trenutak progrevanosti šarže pri termičkoj obradi metala, može identifikovati sa ciklusom grejanja, počev od koga se

srednja snaga tog i narednog ciklusa praktično ne razlikuje. Ta razlika se određuje na osnovu razlike u trajanju perioda uključenosti peći u susednim ciklusima. Dozvoljena razlika je veća što je šarža teža, i za šarže težine > 50 kg može iznositi 3-5 s. S druge strane manja vrednost te razlike, koja odgovara manjim težinama, ne može biti siguran pokazatelj progrevanosti šarže jer i slučajni poremećaji i greške u sistemu šarža-peć-merni sistem mogu dodatno povećati ili smanjiti razliku tih vremena (i srednjih snaga) do 3 s. Iz tog razloga se predloženi postupak može koristiti za određivanje progrevanosti šarži težine $Q \geq 50$ kg. Da je šarža težine $Q \geq 50$ kg progrevana, dovoljan uslov je:

$$t_i - t_{i+1} = 3 - 5 \text{ s} \quad (3)$$

Ako je šarža teža, onda je i neki ciklus pre dostizanja uslova (3) dovoljno progrevana. Pritom, pored težine na to utiču oblik i struktura šarže (primer 1. i 3.).

Što se tiče primene ovog postupka za lake ($< 10-30$ kg) i po pravilu "tanke" šarže, to nije ni potrebno jer je takva šarža praktično progrevana čim se površina šarže zagreje na zadatu temperaturu.

Realizovani elektronski instrument koji registruje trenutak ispunjenja uslova (3) će poslužiti za automatizaciju eksperimentalnih istraživanja kao i za eksperimentalno uvođenje ovog postupka u praksu.

Ovaj postupak je pogodan za primenu na pećima gde se proces termičke obrade vodi računarom. Izradom odgovarajućeg softvera koji uzima u obzir težinu, oblik i strukturu šarže, dolazi se do uslova koji je blaži u odnosu na (3). Time se optimizira vreme trajanja procesa, odnosno optimizira proizvodnost i potrošnja električne energije peći. Očigledno je da se radi o kompletiranju "know-how" za termičku obradu metala koji je interesantan i za proizvođače postrojenja za termičku obradu.

Literatura

- [1] KACEVIĆ, L. S., : *Teorija teploperedači i teplovie rasčeti električkih pećej*, Moskva, "Energija", 1977, str. 304.
- [2] NESENČUK, A. P., i dr.: *Teplovie rasčeti nagreva metala na EVM*, Minsk, "Višejšaja škola", 1977, str. 304.
- [3] Pod redakcijem M. A. Glinkova: *Metalurškičkaskaja teplo-tehnika*, tom 2, Moskva, "Energoatomoizdat", 1990, str. 416.
- [4] Pod redakcijem A. D. Svenčaskova: *Avtomatičeskoe upravlenie elektrotermičeskimi ustanovkami*, Moskva, "Energoatomoizdat", 1990, str. 416.
- [5] LIŠIČIĆ, B. T. Filetin: *Određivanje parametara procesa pooboljšanja pomoću kompjutora*, zbornik radova 4. jugoslovenskog simpozija o toplinskoj obradi metala, Plitvička jezera, maj 1986, str. 551-567.
- [6] JOST, S., Langer H., Pietsch D., Uhlig P.: *Rfchnerische Ermittlung der Erwärmdauer bei der Wärmebehandlung von Stahl*, *Fertigungstechnik und Betrieb* 26(1976)5, S. 298-301.