

NOV PRISTUP ANALIZI NESTACIONARNIH PROCESA TOPLJENJA SiO₂

NEW APPROACH OF THE NON-STATIONARY PROCESS ANALYSIS OF SiO₂ MELTING

SANJA MARTINOVIĆ*, PREDRAG JOVANIĆ*,
DIMITRIJE KRSTIĆ**, MILICA VLAHOVIĆ*

**Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina, Beograd,*

***Tehnološko metalurški fakultet, Beograd*

Priljeno: 07. 05. 2004.

APSTRAKT

U ovom radu dat je nov pristup analizi nestacionarnog procesa topljenja jednokomponentnog sipkastog SiO₂ sistema. Eksperimenti su izvedeni u reaktoru (elektrootpornoj peći), pri čemu je kao polazni materijal korišćen SiO₂-kvarcni pesak, lokaliteta "Donja bela reka". Dobijeni materijal predstavlja poluproizvod u tehnologiji vatrostalnih materijala, a osnovna svojstva su: male vrednosti koeficijenta toplotnog širenja i toplotne provodljivosti, otpornost na termičke šokove i dejstvo kiselih šljaka, relativno visoka mehanička čvrstoća.

Proces stapanja SiO₂ praćen je originalnom metodom vizuelizacije raspodele temperaturskih polja, upotrebom termovizijske kamere. Na osnovu tih merenja dobijeni su temperaturski profili u samom materijalu tokom procesa topljenja. Korelisanjem promena temperaturskih profila u vremenu, utvrđeni su radni modeli procesa. Za prikazani sistem kao model je dobijena stepena troparametarska funkcija. Dati su grafički prikazi korelacije vremenske promene temperature na rastojanju 1 cm od grejača, kao i simulacijom izračunate razlike između radnog modela i eksperimentalno merenih temperatura.

Ključne reči: nestacionarni proces, elektrotopljeni SiO₂, ThV, radni model

ABSTRACT

New approach of the non-stationary process analysis of single component (SiO₂) melting is done in this research. Experiments were realized by the experimental reactor, electro-resistance furnace. Initial raw material was quartz sand, location "Donja bela reka". Obtaining material could be used as a semi finished product in processing of final refractory material with the following properties: low values of the coefficient of thermal expansion, low heat transfer, resistance to the thermal shock and sour slags, high mechanical strength.

Thermo visual camera was used as original visualization method of temperature distribution for observation of SiO_2 melting process. On the basis of these measurements, temperature profiles in the system during the melting process were obtained. Working models of the process were defined by correlation of the temperature profile changes with time. Power three-parameters function is obtained as a model for the system. Correlation of temperature changes with time on a distance of 1 cm from the heater is graphically represented, as well as differences between working model and experimentally measured temperatures calculated by simulation.

Key words: non-stationary process, electrofused silica, ThV, working model

UVODNI DEO

Elektrotermijski postupak dobijanja nekristalnog netransparentnog silicijum-dioksida izveden je u poluindustrijskom postrojenju, elektro-otpornoj peći, u ITNMS-u, Beograd. Peć se napaja električnom energijom jačine 1000-2000 A preko monofaznog transformatora snage 50 kW i naponom 12-15 V. Sandučasti reaktor, otvoren sa gornje strane, izrađen je od vatrostalnog lima debljine 10 mm. Na čeonu stranu peći se za svaku šaržu montira elektrootporni grafitni grejač, dužine 600 mm i prečnika 30-35 mm, a zatim se šaržira sirovina, flotirani kvarcni pesak. Postepenim povećanjem napona i jačine struje, postiže se maksimalna snaga i temperatura topljenja u intervalu od 1723-1850°C koji se održava nekoliko časova, uz stalno dodavanje sirovine i podizanje elektro-otpornog grejača naviše [1, 2, 6, 7].

Temperaturske promene u procesu praćene su snimanjem termovizijskom kamerom (ThV), na osnovu čega su dobijene izoterme i raspodela temperatura u reakcionom prostoru u funkciji vremena.

PRINCIPI TERMOVIZIJSKOG SNIMANJA

Kod procesa kod kojih dolazi do izmena temperatura, osnovni problem je adekvatno merenje temperature u svim tačkama radne zapremine procesa (reaktora). Naime, klasičan način merenja upotrebom termoparova postavlja pitanje izbora mesta merenja temperatura, koje će adekvatno reprezentovati sve temperaturske promene unutar radne zapremine. Osnovna pretpostavka eksperimenta bila je nestacionarnost procesa, sa nizom propratnih efekata tako da korišćenje termoparova ne bi dalo pouzdane rezultate. To su bili osnovni razlozi zbog čega je za snimanje temperaturskog polja i disipacije korišćena termovizijska metoda (ThV), koja je davala informacije o površinskim raspodelama, a ne o temperaturi u jednoj tački.

Činjenica je da svako telo na temperaturi iznad apsolutne nule zrači toplotu, kao i da svaka oblast elektromagnetnog spektra nosi informacije o objektu ili procesu gde je generisana. Dok vidljivi deo spektra nosi podatke o morfološkim svojstvima objekata i vrlo specifičnu informaciju tj. svojstvo objekta-boju, dotle

se toplotna svojstva procesa ili objekata, manifestuju u infracrvenom (IR) delu spektra elektromagnetskog zračenja.

Infracrveni spektar u oblasti 7,5-13 μ m u kojoj se odvija termovizijsko snimanje objekta sa spektralnom rezolucijom od 1,3mrad, daje informacije o raspodeli temperatura na površini posmatranog objekta ili procesa.

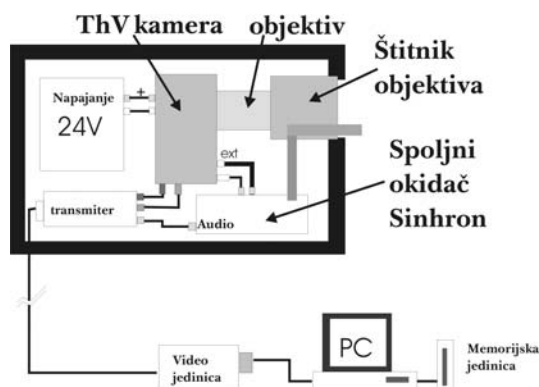
Rezultat termovizijske analize je slika, vizuelna informacija, pri čemu su intenziteti izmerenih infracrvenih zračenja, temperatura, predstavljeni bojom. Naime, dobijene termovizijske slike predstavljaju pseudo bojene slike, nastale korišćenjem LUT (Look Up Tables) tabela, odnosno programskim vezivanjem nivoa temperature, za valere boja. Tako posmatrač dobija trenutnu informaciju o raspodeli temperatura na posmatranom objektu.

Današnji termovizijski sistemi, kao osnovni detektor koriste treću generaciju mikrobolometrijskih poluprovodničkih senzora, kojima nije potrebno hlađenje, što predstavlja značajan napredak [3, 4].

EKSPERIMENTALNI DEO

U toku ovih ispitivanja je korišćena modifikovana kamera AGEMA, model 9000, slika 1. Radi snimanja uvek istog dela reakcionog prostora, detektor kamere sa hladnjakom, A/D 16 bit-ni konvertor i sinhron smešteni su u posebnu kutiju. Arhiviranje snimaka urađeno je na posebnom ZIP medijumu. Aktiviranje kamere omogućio je sinhroni "okidač", stroboskop. Komunikacija između kamere i računara odvijala se zvučnim signalom, koji je označavao uključivanje ili isključivanje kamere.

Rezolucija dobijenih termograma je 480x360 pixela, što odgovara savremenim sistemima za obradu slike. Termogrami su arhivirani u digitalnom obliku (TIFF) na eksternoj memorijskoj jedinici čime je omogućeno beskontaktno merenje u temperaturskoj oblasti od -40° do 2000° C, uz prosečnu tačnost merenja od $\pm 2^{\circ}$ C. Na taj način automatski je generisan i temperaturski pokazivač (temperature bar) koji se prikazuje uz svaku termografsku sliku [4].



Slika - Šematski prikaz termovizijske kamere i sistema za sinhronizaciju
Figure 1 - Schematic presentation of ThV camera and synchronization system

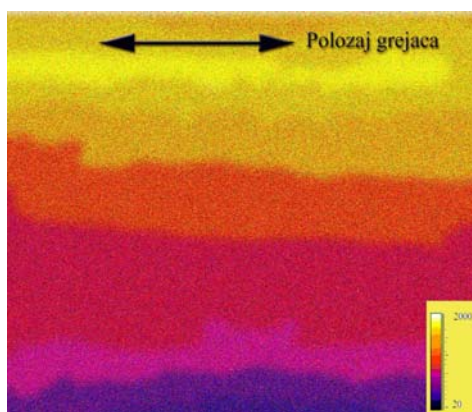
Emisivnost objekta može se definisati posebnim setom merenja ili izabrati automatski iz liste emisivnosti najčešće analiziranih materijala, na osnovu merene temperature propusnog medijuma, u ovom slučaju vazduha. Analiza dobijenih termograma obrađena je posebnim programskim paketom, tipa “explorer”, pri čemu korisnik bira termogram koji treba analizirati.

Postoje dva načina merenja: analiza određene površine, pri čemu se dobija srednja vrednost temperature na definisanoj površini, što je primenjeno i u ovom radu i merenje u tački. Moguće je vršiti i merenje raspodela temperatura po odgovarajućem profilu.

REZULTATI

Urađeno je šest serija eksperimenata sa kvarcnim peskom, pri čemu su se razlikovale visine podizanja elektrode i ukupno vreme trajanja topljenja. Deo procesa topljenja praćen je termovizijskom kamerom radi merenja raspodela temperatura oko elektrootpornog grejača. Uvek se išlo do maksimalne snage, sa pojedinačnim korakom podizanja elektrootpornog grejača od 2cm. Prilikom topljenja, postojanje zarobljenih gasnih mehurova u viskoznom rastopu usloviće nestacionarne procese hlađenja i disipacije temperature, tako da analiza samog procesa treba da pretpostavi nestacionarnost topljenja.

Snimanje reakcione površine i bočnog zida peći termovizijskom kamerom urađeno je radi dobijanja raspodela temperatura u okolini elektrode (10×10 cm). Na slici 2, prikazan je karakterističan bočni snimak sa označenim položajem grejača.

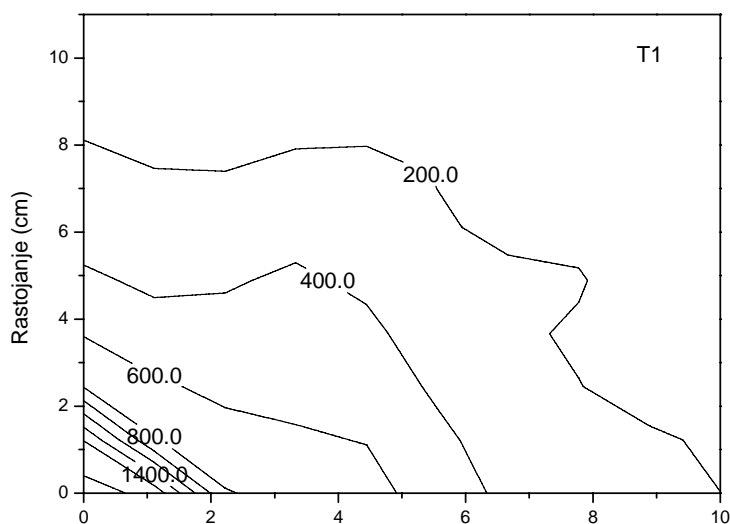


Slika 2 - Bočni snimci termovizijskom kamerom

Figure 2 - ThV camera photos of side view

Da bismo mogli da poredimo temperaturske profile i disipacije temperatura unutar sistema urađena su merenja temperatura na 1, 3, i 5 cm od ose kretanja grejača. U ovom radu prikazana su merenja i analiza na rastojanju 1 cm od ose elektrootpornog grejača, dok se rezultati i analiza merenja na rastojanjima 3 i 5 cm mogu naći u magistarskom radu Sanje Martinović, u biblioteci TMF-a Beograd.

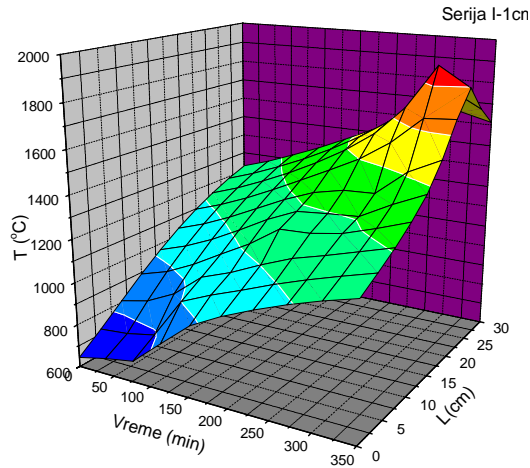
Na osnovu snimaka, ekstrapolacijom izmerenih vrednosti za određene tačke, uz pretpostavku da je temperatura grejača bila 1900°C, dobijeni su konturni dijagrami izotermalnih linija u masi koji predstavljaju snimke u različitim vremenskim intervalima, a samim tim i za različite korišćene snage. Greška merenja je na nivou 5%. U ovom radu su prikazani neki od izotermalnih dijagrama, odnosno termograma dobijenih iz serije snimaka urađenih za topljenje 1. Termovizijski snimci za seriju snimanja 1, pokazali su visok nivo šuma, što može biti rezultat stvaranja velike količine gasova iznad površine materijala. Na slici 3. prikazan je konturni izotermalni dijagram serije 1.



Slika 3 - Konturni izotermalni dijagrami dobijeni ThV-kamerom

Figure 3 - Isothermal diagrams obtained by ThV camera

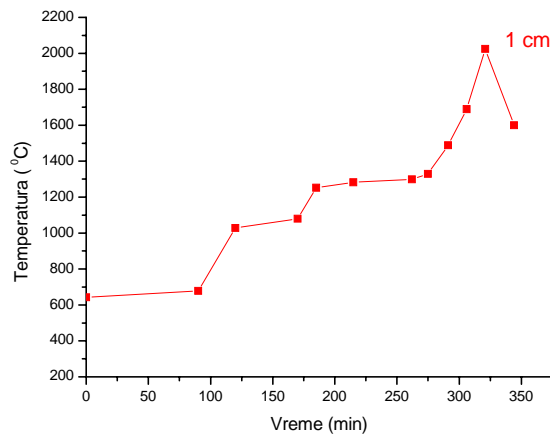
Merenja temperature na 1cm od ose kretanja grejača dobijena ThV serijom snimanja 1 data su trodimenzionim dijagramom zavisnosti vreme-rastojanje-temperatura, slika 4. Na 1 cm od ose grejača dolazi do relativno malih disipacija temperature, tj. može se pretpostaviti da je mehanizam stvaranja i hlađenja rastopa relativno ujednačen.



Slika 4 - Trodimenzioni dijagram zavisnosti vreme-rastojanje temperatura

Figure 4 - 3-D diagraph of time-distance-temperature dependences

Klasični temperaturski profil za rastojanje 1 cm od ose kretanja grejača dat je na dijagramu slike 5.



Slika 5 - Klasičan temperaturski profil zavisnosti temperature od vremena

Figure 5 - Classic temperaure profile of temperature and time dependences

DISKUSIJA

Ideja ovog istraživanja bila je da se naprave radni modeli vremenskih temperaturskih profila tokom procesa na osnovu kojih bi se postavio kontrolni algoritam, odnosno optimizovao proces. U ispitivanom slučaju topljenja prahova, radi se o nestacionarnom, dinamičkom procesu, za koji je gotovo nemoguće definisati jednoznačan matematički model u odnosu na parametre

procesa. Zbog toga, umesto definisanja modela procesa, primenjen je metod “crne kutije” odnosno povezivanje parametara procesa, temperature i vremena.

Nas nije “interesovao” način transformacije prahova u nekrystalnu staklenu masu u datom vremenskom intervalu merenja, već samo promena temperature ΔT , na definisanom rastojanju od grejača, 1 cm. Možemo smatrati da je vrednost izmerene temperature kumulativna informacija koja je posledica procesa u datoj zapremini u posmatranom vremenskom intervalu. Vezivanjem dobijenih informacija o promenama temperatura u vremensku seriju, model, moguće je dobiti matematičku formulu tih promena. Postavlja se pitanje kako definisati najadekvatniji matematički oblik.

“Stepen korelacije” u matematičkoj analizi pokazuje koliko dobro model opisuje eksperimentalne podatke. U procesu, merenja predstavljaju fizičke veličine, a ne samo brojeve, pa i analiza mora da obuhvati jednostavne modele (jednačine). Mi smo se ograničili na korišćenje linearnih modela. Grafik na slici 6. prikazuje korelaciju vremenske promene temperature na rastojanju 1 cm od grejača.

Kao model dobijena je stepena funkcija:

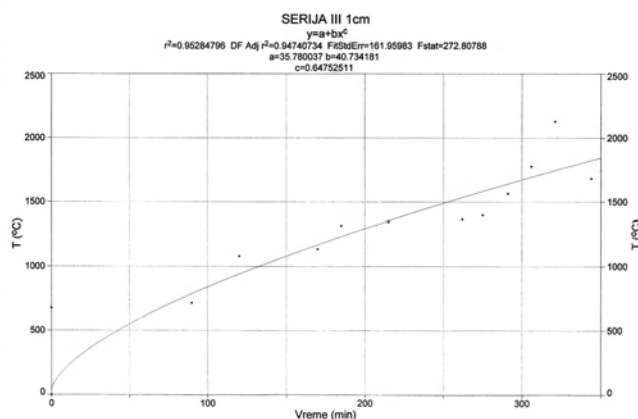
$$y=a+bx^c$$

troparametarska funkcija sa vrednostima parametara:

$$a=35,7$$

$$b=40,73$$

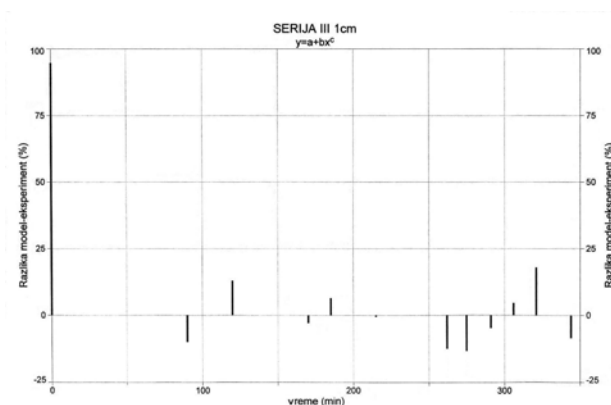
$$c=0,64$$



Slika 6 - Grafčki prikaz korelacije vremenske promene temperature na rastojanju 1 cm od grejača

Figure 6 - Graphical presentation of temperatures changing with time at the distance of 1 cm

Simulacijom je izračunata razlika između modela (radnog) i eksperimentalno merenih temperatura, a rezultati su prikazani na grafiku, slika 7.



Slika 7 - Grafički prikaz razlika između radnog modela i izmerenih temperatura
Figure 7 - Graphical presentation of differences between working model and measuring temperatures

Uočava se da apsolutna vrednost razlika ne prelazi 20% i da raste ka većim vremenima. To može da znači da se posle određenog vremena javljaju sekundarne interakcije u sistemu, koje utiču na sam proces. Interesantno je primetiti promenu mernih tačaka na 200 minuta od početka procesa.

Tabela 1 prikazuje vrednosti parametara modela na rastojanju 1 cm od grejača, za svih šest serija snimanja. Na osnovu tih vrednosti izračunate su granične vrednosti parametara modela. Osnova za izračunavanje bio je uslov minimizacije razlike sa eksperimentalnim vrednostima [3, 8, 9, 10].

Tabela 1 - Vrednosti parametara modela na rastojanju 1 cm od grejača

Table 1 - Values of model parameters, at the distance of 1 cm from the heater

	a	b	c
serija 1	36,91	42,21	0,71
serija 2	35,77	40,70	0,78
serija 3	35,78	40,73	0,64
serija 4	36,11	41,80	0,63
serija 5	36,12	40,70	0,64
serija 6	34,78	40,75	0,72

ZAKLJUČAK

Predložen je nov pristup analizi nestacionarnog procesa topljenja jednokomponentnog sipkastog SiO₂ sistema, kvarcnog peska u elektrootpornoj peći sa pokretnim grafitnim grejačem.

Merenjem temperature, metodom termovizijskog snimanja, dobijene su trenutne informacije o površinskim temperaturnim raspodelama u funkciji vremena.

Na osnovu analize temperatura na rastojanju 1 cm od ose grejača, dobijen je radni model vremenskih temperaturnih profila tokom procesa.

Ovaj radni model zajedno modelima dobijenim za rastojanja 3 i 5 cm od ose grejača služe za definisanje kontrolnih algoritama procesa.

Proračunat je i "stepen korelacije" - mera kvaliteta korelacije i granične vrednosti za parametre modela

LITERATURA

- [1] Robert H. Doremus, *Glass Science*, 2nd Edition, John Wiley & Sons Inc., 1994.
- [2] Огнеупорное производство, Справочник, Том 1, Под общей редакцией инж. Д.И. Гавриша, Издательство металлургия, 1965.
- [3] Predrag Jovani}, *Doktorska disertacija*, TMF, Beograd, 1993.
- [4] *Tehni~ka dokumentacija ThV kamere-Agema*; serija 1000.
- [5] Д. И. Гавриш, А. Н. Соколов, А. Е. Генделев,...; Подучение плавленого кварца в электропечи полунепрепыбного действия, 5-10, Огнеупоры, 8, Москва, 1979.
- [6] Д. И. Гавриш, В. И. Громов, В. В. Коломейцев, К. А. Красотив,...; *Производство стаканов из непрозрачного кварцевого стекла*, 6-9, Огнеупоры, 9, Москва, 1978.
- [7] Ю.А.Самойловуч, *Микро-компьютер в решении задач кристаллизации слитка*, Москва, "Металлургия", 1988.
- [8] Э.А.Иодко, В.С.Шкляр, *Моделирование тепловых процессоов в металлургии*, издательство "Металлургия", Москва, 1967.
- [9] А.А.Веленький, *Математическое моделирование и оптимизация процессов литья и прокатки цветных металлов*, Металлургия, Москва, 1983.