

## UTICAJ PRENOSA TOPLOTE NA ODREĐIVANJE TERMOSTABILNOSTI VATROSTALNOG MATERIJALA

## INFLUENCE OF HEAT TRANSFER CONDITIONS ON DETERMINATION OF THERMAL SHOCK RESISTANCE OF REFRACTORIES

S.JORDANOVIĆ, T.VOLKOV-HUSOVIĆ

*Tehnolosko-metalurški fakultet, Beograd*

Primljeno: 10. 01. 2002.

### IZVOD

Cilj ovog rada bio je da se odredi termostabilnost izabrane grupe vatrostalnih materijala na bazi ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ ) u uslovima prenosa toplote različitim od standardnih (test JUS. B. D.8 319.) kao i da se utvrdi njihov uticaj na otpornost materijala ka termošoku. Pri određivanju termostabilnosti pošlo se od pretpostavke da je prirodna konvekcija glavni mehanizam prenosa toplote, izražena Holmanovom jednačinom. Uticaj uslova prenosa toplote na termostabilnost materijala razmatran je dvojako: za različitu temperaturu fluida za hlađenje, kao i za različite temperaturske razlike (zagrejani uzorak-rashladni fluid).

Dobijeni rezultati pokazuju da uslovi prenosa toplote u velikoj meri utiču na veličinu termostabilnosti materijala. Takođe, postoji visok stepen korelacije između rezultata dobijenih standardnom metodom – test JUS. B. D.8 319 i izračunatih parametara temperaturske razlike, pa se parametri temperaturske razlike mogu uspešno koristiti u cilju predviđanja termostabilnosti vatrostalnih materijala.

**Ključne reči:** termostabilnost, termošok, vatrostalni materijali, temperaturska razlika, parametri otpornosti.

### ABSTRACT

The goal of this thesis was to determine the thermal shock resistance of alumina based refractories in the case of a heat transfer conditions different from the standard conditions given by quenching test JUS. B. D.8 319. The general assumption at determination of thermal shock resistance of refractories was that convective heat transfer was a main heat transfer mechanism, described by equation given by Holman.

Influence of the heat transfer conditions on thermal shock resistance of refractories was investigated in two different ways: influence of the temperature of the quenching medium, and temperature difference between heated sample and quenching medium.

The results showed that heat transfer conditions has strong affection on thermal shock resistance of refractories. High level of correlation between experimental results obtained by standard test and results for critical values of thermal difference obtained by calculation was observed.

**Key words:** thermal shock resistance, refractories, temperature difference, resistance parameters.

## 1. UVOD

Vatrostalni materijali su u uslovima eksploatacije izloženi dejstvu visokih temperatura ali i njihovim naglim promenama usled čega termostabilnost kao mera otpornosti na nagle promene temperature često igra presudnu ulogu pri izboru i primeni određenog vatrostalnog materijala.

U cilju što bolje karakterizacije materijala u odnosu na vrednost termostabilnosti koju poseduju razvijen je veliki broj metoda ispitivanja, kako eksperimentalnih tako i teorijskih. Kao najznačajnija i ujedno najjednostavnija eksperimentalna metoda izdvaja se metoda naglog hlađenja uzoraka od vatrostalnih materijala u vodi, pri čemu metoda standardizovana i odnosi se na defini-sane uslove prenosa toplote. Na drugoj strani razvijen je veliki broj teorijskih pristupa u cilju predviđanja ponašanja materijala izloženog termošoku koji se u suštini razlikuju po tome da li za osnovu imaju prenos toplote ili mehaniku loma.

## 2. PARAMETRI TEMPERATURSKE RAZLIKE

U materijalu izloženom naglim promenama temperature dolazi do pojave termičkog naprezanja datog sledećom jednačinom [1,2].

$$\sigma = E\alpha\Delta T f(Bi) \quad (2.1)$$

Najčešće se predpostavlja da se kritična vrednost temperaturske razlike  $\Delta T_c$  pri kojoj dolazi do znatnog smanjenja čvrstoće uzorka postiže kada se indukovano termičko naprezanje ó izjednači ili premaši po vrednosti zateznu čvrstoću materijala  $\sigma_f$ . Temperaturska razlika koja predstavlja osetljivost vatrostalnog materijala na termošok može se predstaviti i jednačinom [2]:

$$\Delta T_1 = (\sigma_f / E \alpha)(a/h) \quad (2.2)$$

Ukoliko se razmatra prenos toplote u uslovima rasta dugih prskotina koristi se sledeći izraz [2]:

$$\Delta T_2 = (k / \alpha) (\gamma / E)^{1/2} (a / h) \quad (2.3)$$

Na kraju treba napomenuti da vrednosti kritične temperaturske razlike mogu da se razlikuju po nekoliko reda veličine duž određenog temperaturnog intervala u kome se vrši ispitivanje.

Ovo je posebno karakteristično za vodu kao medijum za hlađenje usled pojave ključanja i stvaranja tankog filma vodene pare po površini uzorka usled čega postoji mogućnost da mehanizam prenosa toplote prestaje da bude prirodna ili prinudna konvekcija već proces kondukcije [7].

### 3. TERMOMEHANIČKE OSOBINE MATERIJALA

Termomehaničke osobine, za tri različita materijala, koje su korišćene za izračunavanje vrednosti parametara temperaturske razlike  $\Delta T_1$  i  $\Delta T_2$  date su u radovima [2, 11-14].

### 4. PRIRODNA KONVEKCIJA (HOLMANOVA JEDNAČINA)

Pošto se ovaj rad zasniva na na ispitivanjima termostabilnosti prema testu (JUS B. D.8. 319) to u ovom slučaju imamo prenos toplote koji odgovara uslovima prirodne konvekcije. Za uslove prirodne konvekcije, srednja vrednost koeficijenta prenosa toplote, za vodu kao medijum za hlađenje, može se izračunati prema sledećem izrazu [7]:

$$h = 0.53 (N_{Gr} N_{Pr})^{1/4} (k_f / d) \quad (4.1)$$

Pri čemu se vrednosti Grashohovog i Prandtlovog broja mogu izračunati prema sledećim izrazima, respektivno:

$$N_{Gr} = g\beta (T_o - T_f) d^3 / \nu_f^2 \quad (4.2)$$

$$N_{Pr} = \nu_f / \kappa_f \quad (4.3)$$

### 5. USLOVI PRENOSA TOPLOTE

Kako je cilj ovog rada da se ispita uticaj prenosa toplote na termostabilnost izabrane grupe vatrostalnih materijala to će u ovom poglavlju biti razmotreno u kojoj meri promena vrednosti temperature sredstva za hlađenje kao i promena vrednosti temperaturske razlike ( $T_o - T_f$ ) utiču na uslove prenosa toplote.

Pošto se sva razmatranja odnose na vodu kao medijum za hlađenje to su na osnovu fizičkih osobina vode [10] datih u tabeli 1 i jednačina (4.1.), (4.2.), (4.3.) određeni uslovi prenosa toplote koji su dati u sledećim poglavljljima.

*Tabela 1 - Fizičke osobine vode u zavisnosti od temperature*

*Table 1 - Physical properties of water dependig the temperature*

Parametar	Temperatura vode (°C)		
	15	20	25
$\beta$ (1/K)	$1.26 \times 10^{-4}$	$1.82 \times 10^{-4}$	$2.515 \times 10^{-4}$
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	999.13	998.23	997.08
$\nu_f$ (m <sup>2</sup> /s)	$1.166 \times 10^{-6}$	$1.006 \times 10^{-6}$	$0.9055 \times 10^{-6}$
$k_f$ (W/mK)	$58.65 \times 10^{-2}$	$59.9 \times 10^{-2}$	$60.85 \times 10^{-2}$
$c_p$ (KJ/kgK)	4.187	4.183	4.178
$\kappa_f$ (m <sup>2</sup> /s)	$1.401 \times 10^{-7}$	$1.434 \times 10^{-7}$	$1.460 \times 10^{-7}$

### 5.1. Uticaj temperature fluida za hlađenje na vrednost koeficijenta konvektivnog prenosa toplote

Da bi se ispitaio uticaj temperature vode, kao medijuma za hlađenje, na uslove prenosa toplote, izračunate su vrednosti Prandtlovog i Grashohovog broja kao i vrednosti koeficijenta prenosa toplote  $h$ , za tri različite temperature vode, pri čemu je u sva tri slučaja vrednost temperaturske razlike ( $T_o - T_f$ ) iznosila  $930^\circ\text{C}$ .

Dobijeni rezultati su prikazani u sledećoj tabeli.

Tabela 2. Uslovi prenosa toplote u zavisnosti od temperature vode

Table 2. Heat transfer conditions depending on water temperature

Parametar	15°C	20°C	25°C
Prandtlov broj, $N_{Pr}$ (-)	8.251	7.015	6.202
Grashohov broj $N_{Gr}$ (-)	$732.076 \times 10^7$	$1009.334 \times 10^7$	$1345.532 \times 10^7$
Koef. konvektivnog prenosa toplote, $h$ ( $\text{J}/\text{m}^2\text{sK}$ )	3082.049	3275.279	3466.752

Na osnovu rezultata iz gornje tabele vidi se da sa porastom temperature vode pri konstantnoj vrednosti temperaturske razlike ( $T_o - T_f$ ) dolazi do pada vrednosti Prandtlovog broja dok vrednosti Grashohovog broja i koeficijenta prenosa toplote rastu, pa se može zaključiti da temperatura vode odnosno temperatura fluida za hlađenje utiče na vrednost koeficijenta prenosa toplote tj. na uslove prenosa toplote.

### 5.2. Uticaj temperaturske razlike ( $T_o - T_f$ ) na vrednost koeficijenta konvektivnog prenosa toplote

Kao i u prethodnom slučaju izračunate su vrednosti Prandtlovog i Grashohovog broja kao i vrednosti koeficijenta prenosa toplote  $h$ , pri čemu se dobijene vrednosti predstavljene u tabeli 4. odnose na pretpostavljene uslove naglog hlađenja vatrostalnih materijala date u tabeli 3.

Tabela 3. Pretpostavljeni uslovi naglog hlađenja za sve materijale

Table 3. Assumed quenching conditions for all materials

	A	B*	C
Temperaturska razlika ( $T_o - T_f$ ), ( $^\circ\text{C}$ )	730	930	1130
Temperatura vode, ( $^\circ\text{C}$ )	20	20	20

\*Eksperimentalni rezultati za termostabilnost tj. broj ciklusa na osnovu izvedenog testa (JUS. B. D.8 319) odnose se na uslove naglog hlađenja date pod B.

*Tabela 4. Uslovi prenosa toplote u zavisnosti od pretpostavljenih uslova naglog hlađenja*

*Table 4. Heat transfer conditions depending on assumed quenching conditions*

Parametar	A	B	C
$N_{Pr} (-)$	7.015	7.015	7.015
$N_{Gr} (-)$	$792.273 \times 10^7$	$1009.334 \times 10^7$	$1226.395 \times 10^7$
$h (J/m^2sK)$	3082.892	3275.279	3438.723

Iz tabele 4.se vidi da su dobijene vrednosti za koeficijent konvektivnog prenosa toplote relativno bliske, pri čemu se uočava i linearan rast koeficijenta konvektivnog prenosa toplote što je posledica korišćenja istog medijuma za hlađenje kao i linearnog rasta vrednosti temperaturske razlike ( $T_o-T_f$ ).

## 6. DOBIJENI REZULTATI I DISKUSIJA

### 6.1. Vrednosti parametara temperaturske razlike

Na osnovu jednačina (2.2) i (2.3), dobijenih vrednosti za koeficijent konvektivnog prenosa toplote  $h$  iz tabele 4. i termomehaničkih osobina materijala izracunate su vrednosti parametara temperaturske razlike  $\Delta T_1$  i  $\Delta T_2$  čije su vrednosti date u tabelama 5 do 7.

Dobijene vrednosti parametara temperaturske razlike  $\Delta T_1$  i  $\Delta T_2$  iz tabele 6. za uslove naglog hlađenja date pod B biće grafički upoređene sa eksperimentalnim vrednostima dobijenim za broj ciklusa naglog hlađenja iz tabele 3.1. Na taj način biće utvrđeno da li između ovih rezultata postoji korelacija i u kom stepenu.

Dobijena zavisnost će biti iskorišćena za proraračun termostabilnosti odnosno broja ciklusa naglog hlađenja za uslove date pod A i C jer se oni razlikuju od standardnih uslova.

*Tabela 5 - Vrednosti parametara temperaturske razlike za uslove prenosa toplote pod A*

*Table 5 - Thermal shock resistance parameters for heat transfer conditions in the case "A"*

Parametar temperaturske razlike	I	II	III
$\Delta T_1 (^\circ C)$	0.393	0.337	0.530
$\Delta T_2 (m^{1/2} ^\circ C)$	0.113	0.135	0.155

*Tabela 6 - Vrednosti parametara temperaturske razlike za uslove prenosa toplote pod B*

*Table 6 - Thermal shock resistance parameters for heat transfer conditions in the case "B"*

Parametar temperaturske razlike	I	II	III
$\Delta T_1$ (°C)	0.370	0.318	0.499
$\Delta T_2$ (m <sup>1/2</sup> °C)	0.106	0.127	0.146

*Tabela 7 Vrednosti parametara temperaturske razlike za uslove prenosa toplote pod C*

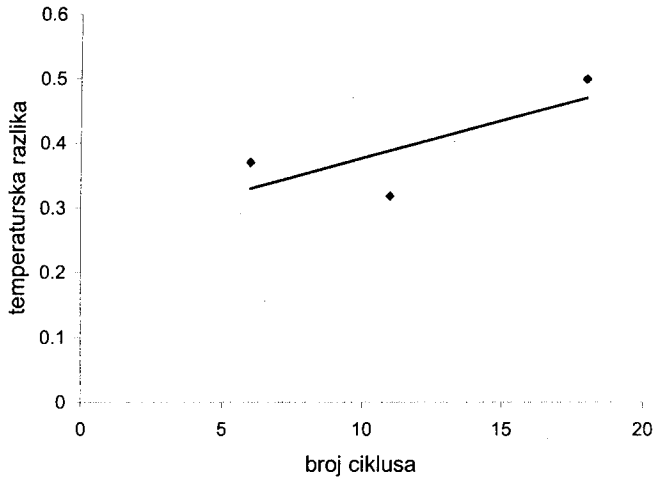
*Table 7 - Thermal shock resistance parameters for heat transfer conditions in the case "C"*

Parametar temperaturske razlike	I	II	III
$\Delta T_1$ (°C)	0.353	0.302	0.476
$\Delta T_2$ (m <sup>1/2</sup> °C)	0.101	0.121	0.139

Iz navedenih tabela sa uočava linearan pad vrednosti parametara  $\Delta T_1$  i  $\Delta T_2$ . Dobijene vrednosti su bliske za sve uslove naglog hlađenja što je posledica bliskih vrednosti koeficijenta konvektivnog prenosa toplote  $h$ . U slučaju uslova prenosa toplote pod C dobijene vrednosti  $\Delta T_1$  i  $\Delta T_2$  su značajno manje u poređenju sa onim dobijenim u slučaju pod A i B što je rezultat oštrijih uslova hlađenja. To bi trebalo za posledicu da ima manju termostabilnost materijala odnosno manji broj ostvarenih ciklusa naglog hlađenja, jer je materijal izložen oštrijim uslovima hlađenja.

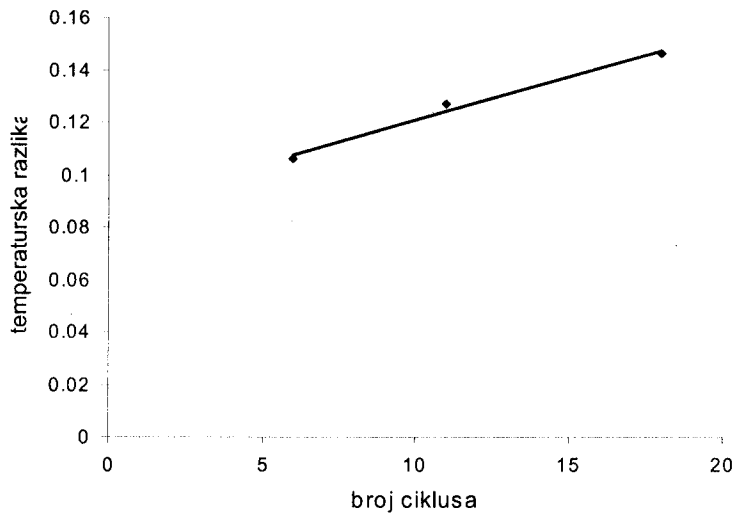
### *6.2. Poređenje parametara temperaturske razlike sa vrednostima broja ciklusa dobijenih standardnom metodom*

Dobijeni rezultati za vrednosti parametara temperaturske razlike  $\Delta T_1$  i  $\Delta T_2$  iz tabele 6. predstavljeni su grafički u funkciji od broja ciklusa na slikama 1. i 2. Na taj način biće utvrđeno da li i u kojoj meri postoji korelacija između rezultata dobijenih računskim putem i rezultata dobijenih standardnom metodom.



Slika 1 - Parametar temperaturske razlike  $\Delta T_1$  u funkciji broja ciklusa

Figure 1 - Thermal shock resistance parameter  $\Delta T_1$  as function of number of cycles,  $N$



Slika 2 - Parametar temperaturske razlike  $\Delta T_2$  u funkciji broja ciklusa

Figure 2 - Thermal shock resistance parameter  $\Delta T_2$  in function of number of cycles,  $N$

Sa obe slike se uočava linearna zavisnost parametara temperaturske razlike  $\Delta T_1$  i  $\Delta T_2$  sa brojem ciklusa pri čemu je stepen korelacije znatno veći u slučaju parametra  $\Delta T_2$  što pokazuju i rezultati linearne regresione analize dati u tabeli 8.

*Tabela 8 - Rezultati linearne regresione analize*

*Table 8 - Results of linear regression analysis*

Poređenje $\Delta T$ sa brojem ciklusa	Koeficijent korelacije	Standardna greška aproksimacije	Zavisnost
( $\Delta T_1$ -N )	0.758087	0.085948	$N = 85.47 \Delta T_1 - 22.128$
( $\Delta T_2$ -N )	0.992224	0.003522	$N = 303.03 \Delta T_2 - 26.636$

### *6.3. Dobijeni rezultati za broj ciklusa u uslovima prenosa toplote različitim od standardnih uslova*

Na osnovu dobijenih zavisnosti između parametara  $\Delta T_1$  i  $\Delta T_2$  i broja ciklusa iz tabele 6.2.1. moguće je proračunati broj ciklusa naglog hlađenja za uslove prenosa toplote date pod A i C, jer se oni razlikuju od onih za slučaj standardne metode naglog hlađenja. Pošto je stepen korelacije između parametra temperaturske razlike  $\Delta T_2$  i broja ciklusa N znatno veći od onog između parametra  $\Delta T_1$  i broja ciklusa N, to je ovaj prvi iskorišćen za proračun broja ciklusa za slučajeve prenosa toplote pod A i C, a u cilju dobijanja što tačnijih rezultata. Rezultati su dati u tabeli 9.

*Tabela 9 - Proračunati broj ciklusa naglog hlađenja za uslove prenosa toplote pod A i C.*

*Table 9 - Calculated number of cycles for heat transfer conditions in the case "A" and case "C"*

	A			C		
	I	II	III	I	II	III
Broj ciklusa, N	7.60	14.27	20.33	3.97	10.03	15.48

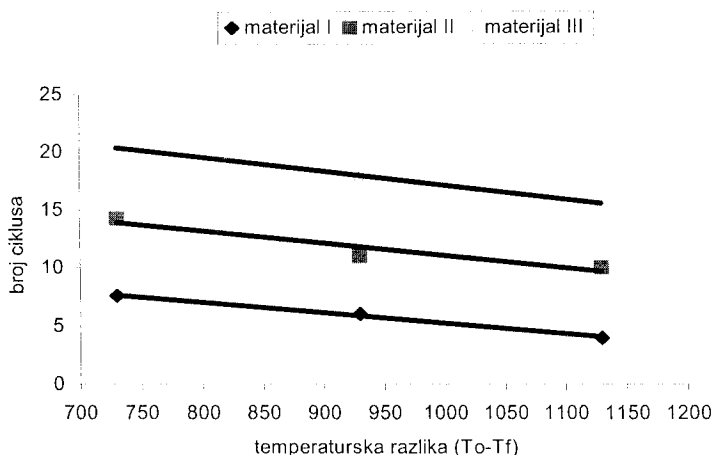
Iz tabele 9. uočava se da je u slučaju uslova prenosa toplote pod A, pretpostavljeni broj ciklusa naglog hlađenja koji može da izdrži svaki materijal za 1-3 ciklusa veći u odnosu na broj ciklusa prilikom naglog hlađenja u uslovima standardne metode (JUS. B. D.8 319). Ovakvi rezultati su bili i očekivani s obzirom da su uslovi naglog hlađenja pod A blaži od onih u slučaju



standardne metode i da njima odgovara manji koeficijent konvektivnog prenosa toplote  $h$  (tabela 4).

Za slučaj prenosa toplote pod C pretpostavljeni broj ciklusa koji materijali mogu da izdrže je za 1-3 ciklusa manji od onog u uslovima standardne metode, što je takođe očekivani rezultat jer su uslovi naglog hlađenja u slučaju pod C mnogo oštriji od onih datim u slučaju B odnosno još oštriji u odnosu na one date uslovima pod A.

Dobijeni rezultati predstavljeni su grafički na slici 3.



Slika 3 - Proračunati broj ciklusa naglog hlađenja u funkciji temperaturske razlike ( $T_o-T_f$ ) za sva tri ispitivana materijala.

Figure 3 - Calculated number of cycles,  $N$  as function of temperature difference ( $T_o-T_f$ ) for all materials

## 7. ZAKLJUČAK

U ovom radu izvršena su razmatranja uticaja uslova prenosa toplote na termostabilnost grupe vatrootalnih materijala primenom parametara temperaturske razlike  $\Delta T_1$  i  $\Delta T_2$  a na osnovu poznatih rezultata za broj ciklusa dobijenih standardnom metodom naglog hlađenja.

Na osnovu rezultata iz poglavlja 5.1 uočava se da temperatura vode kao medijuma za hlađenje ima znatan uticaj na vrednosti koeficijenta prenosa toplote u slučaju kada se razmatranje termostabilnosti materijala vrši sa stanovišta konvektivnog prenosa toplote. Međutim u obzir treba uzeti i činjenicu da su procesi naglog hlađenja praćeni pojavom fenomena ključanja i stvaranja parnog sloja oko uzorka što za posledicu ima i promenu mehanizma prenosa toplote, pa bi za dobijanje tačnijih rezultata u razmatranje bilo

neophodno uzeti i procese prenosa toplote kondukcijom i zračenja pri čemu jedna takva dublja analiza izlazi iz okvira ovog rada.

Što se pak tiče uticaja vrednosti temperaturske razlike ( $T_o-T_f$ ) na uslove prenosa toplote već je pomenuto u poglavlju 5.2 da sa porastom vrednosti temperaturske razlike dolazi i do porasta koeficijenta prenosa toplote što kao posledicu ima manju termostabilnost ispitivanih materijala pri čemu su ovakvi rezultati bili i očekivani.

Rezultati dobijeni u poglavljima 6.1, 6.2 i posebno oni iz poglavlja 6.3 pokazuju da postoji visok stepen korelacije između rezultata dobijenih standardnom metodom i izracunatih parametara temperaturske razlike. Osim toga dobijeni rezultati pokazuju da se parametri temperaturske razlike  $\Delta T_1$  i  $\Delta T_2$  mogu uspesno koristiti za predviđanje termostabilnosti vatrostralnih materijala u uslovima prenosa toplote različitim od onih koji su definisani standardnom metodom ispitivanja.

Na taj način pokazano je da je termostabilnost vatrostralnih materijala moguće proceniti na osnovu termomehaničkih osobina materijala (čije je određivanje uobičajena praksa) i vrednosti parametara temperaturske razlike.

## LITERATURA

- [1] Z. Popović, T. Volkov-Husovic, "Vatrostalni materijali", Skripta, Interni materijal Katedre, TMF, Beograd, 2000
- [2] T. Volkov-Husović, Doktorska disertacija, TMF, Beograd, 1999
- [3] R. C. Bradt, "Fracture Measurements of Refractories: Past, Present and Future" Am. Ceram. Soc. Bull. 67 (1988) 1176-1178
- [4] P. F. Becher, D. Lewis III, K.R. Carman, A. C. Gonzales, "Thermal Shock Resistance of ceramics: Size and Geometry Effects in Quench Tests", Am. Ceram. Soc. Bull. 59 (5) (1980) 542-548
- [5] W. D. Kingery, "Factors Affecting thermal Stress Resistance of Ceramic Materials", J. Am. Ceram. Soc. 61 (7-8) (1978) 355-358
- [6] J. Nakayama, M. Ishizuka, "Experimental Evidence for Thermal Shock Damage Resistance", Am. Ceram. Soc. Bull. 45 (7) (1965) 666-669
- [7] H. Hencke, J. R. Thomas, Jr., D. P. Hasselman, "Role of Material Properties in the Thermal-Stress Fracture of Brittle Ceramics Subjected to Conductive Heat Transfer", J. Am. Ceram. Soc. 67 (6) (1984) 393-398

- [8] S. S. Manson, R. W. Smith "Theory of Thermal Shock Resistance of Brittle Materials Based on Weibull's Statistical Theory of Strength", J. Am. Ceram. Soc. 38 (1) (1955) 18-27
- [9] J. H. Ainsworth, R. H. Herron, "Thermal-Shock Damage Resistance of Refractories", Am. Ceram. Soc. Bull. 53 (7) (1974) 533-538
- [10] Đ.Kozić, V. Bekavac, B. Vasiljević, "Priručnik za termodinamiku", Mašinski fakultet, Beograd, (1979)
- [11] T.D.Volkov-Husović, R.M.Jančić, "Uticaj prirodne konvekcije na termostabilnost vatrostalnih materijala", Metalurgija, No 1, Vol 7, (2001) 59-67
- [12] T.D.Volkov-Husović, R.Jančić, Z.Popović, " Analiza uticaja parametara pri prirodnoj konvekciji na određivanje termostabilnosti vatrostalnog materijala na bazi  $Al_2O_3$ ", Metalurgija, Vol7, No 3. (2001) 191-199
- [13] T.Volkov-Husović, R.Jančić, M.Cvetković, D.Mitraković, Z.Popović, "Thermal Shock Behavior of Alumina Based Refractories : Fracture Resistance Parameters and Water Quench Test", Materials Letters, 38 (1999) 372-378
- [14] T.D.Volkov-Husović, Z.V.Popović, "Resistance parameters and water quench test as criteria of thermal shock behaviour of alumina refractories", Material Science and Technology, Vol 15, No 10 (1999) 1216-1219
- [15] S.Jordanović, Uticaj prenosa toplote na određivanje termostabilnosti vatrostalnog materijala, Diplomski rad, TMF. Beograd, 2001.