

**ODREDJIVANJE DINAMIČKOG JUNGOVOG
MODULA ELASTIČNOSTI TOKOM ISPITIVANJA
TERMOSTABILNOSTI VATROSTALNOG MATERIJALA**

**INVESTIGATION OF DYNAMIC YOUNG MODULUS DURING
THERMAL STABILITY TESTING OF THE REFRACTORY
MATERIAL**

D. PRTENJAK¹, M. MATIJAŠEVIĆ¹, M. CVETKOVIĆ²,
J. MAJSTOROVIĆ², T. VOLKOV-HUSOVIĆ¹

¹*Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd*

²*Rudarsko-geološki fakultet, Beograd*

IZVOD

Ispitivana je termostabilnost vatrostralnog materijala sa sadržajem 42 % Al_2O_3 . Korišćena je standardna metoda vodenog hladjenja (JUS.B.D8.319.). Uzorci su snimljeni pre ispitivanja, kao i posle određenog broja ciklusa. Dinamički Jungov modul elastičnosti je određen na osnovu izmerenih brzina logitudinalnih (V_p) i transverzalnih (V_s) talasa. Pretstavljene su vrednosti dinamičkog modula elastičnosti i promene pritiskne čvrstoće u funkciji broja ciklusa ispitivanja termostabilnosti. Na osnovu dobijenih rezultata data je analiza praćenja ponašanja vatrostralnog uzorka izloženom termošoku.

Ključne reči: vatrostalni materijal, dinamički Jungov modul elastičnosti, termostabilnost

ABSTRACT

Thermal stability of the refractory material with the content of 42 % Al_2O_3 was investigated. Water quench test (JUS.B.D8.319.) was applied. Photographs of the samples before cycling, and after some number of cycles were given. Dynamic Young modulus of elasticity was calculated using measured values of longitudinal (V_p) and transverzal (V_s) velocities. Values of dynamic Young modulus and changing in compressive strength during testing were presented as function of the measured number of quench experiments. Analysis of the thermal shock behavior of the samples based on the obtained results was given.

Key words: refractories, dynamic Young modulus, thermal stability

1. UVOD

Vatrostalni materijali su u uslovima eksploatacije često izloženi naglim promenama temperature. Zbog toga je određivanje njihove termostabilnosti, sastavni deo uobičajnih ispitivanja. U ovom radu je predstavljeno praćenje termostabilnosti materijala satava 42 % Al_2O_3 .

Termošokovi u vatrostalnom materijalu dovode do pojave kvazistatičkiog ili dinamičkog rasta prskotina, što se manifestuje smanjenjem čvrstoće. Poznato da pojava mikro i makro prskotina u materijalu ima uticaja na brzine longitudinalnih i transverzalnih talasa, kao i Jungov modul elastičnosti materijala. Ovo je iskorišćeno za direktno praćenje nivoa oštećenja uzoraka prilikom ispitivanja termostabilnosti. Iako je praćenje pojave i razvoja prskotina prilikom termošoka od značaja za materijal prilikom ugradnje i rada u industriji, sa aspekta veka trajanja materijala, kao i sigurnosti konstrukcija, do sada nije u literaturi bilo mnogo radova koji se odnose na nedestruktivne metode koje bi se mogle upotrebiti. U literaturi su poznati radovi Copaka [1], kao i grupe autora [2-4], koji su se bavili primenom nedestruktivnih metoda pri praćenju termostabilnosti.

2. EKSPERIMENTALNI DEO

2.1. Materijal

Grupa materijala na bazi Al_2O_3 je korišćena i u ranijim ispitivanjima termostabilnosti, u okviru kojih je određen niz termomehaničkih osobina [4-13]. U ovom radu su korišćeni uzorci sa 42 % Al_2O_3 čije su relevantne osobine predstavljene u tabeli 1.

Termostabilnost odabranih uzoraka je određena standardnom metodom vodenog hladjenja (JUS.B. D8. 319).

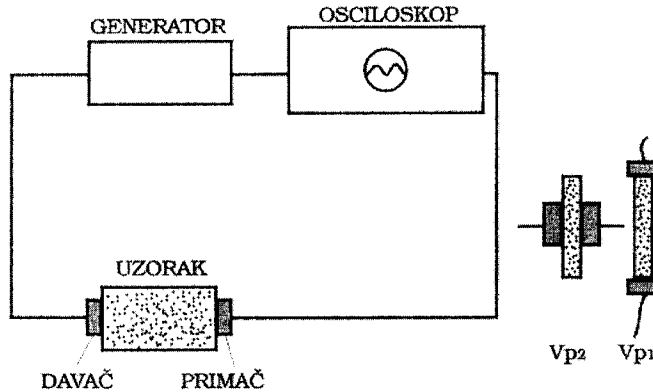
Tabela 1 - Sastav i termomehaničke karakteristike uzoraka [4-9]

Table 1 - Structure and termomechanical properties of materials [4-9]

Parametar	vrednost
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$, (%)	42
Gustina, ρ (g/cm^3)	2.93
Konduktivnost, k (W/mK)	1.35
Specifična toplota, c (kJ/kgK)	1.03
Koef. linearnog termičkog širenja, α (%)	0.7
Pritisna čvrstoća, σ_p (MPa)	43
Savojna čvrstoća, σ_s (MPa)	7.4
Energija loma, γ (kJ/m^2)	15
Termostabilnost, (broj ciklusa)	11

2.2. Određjivanje dinamičkog modula elastičnosti i Poasonovog koeficijenta

Korišćena metoda određivanja dinamičkog Jungovog modula elastičnosti (JUS. D. B8.121) je prikazana sa slici 1.



Slika 1 - Shematski prikaz metode
Figure 1 - Schematic diagram of the method

Na osnovu utvrđenih vrednosti za brzine longitudinalnih (V_p) i transverzalnih (V_s) talasa, prema poznatoj vrednosti za zapreminsku težinu (γ), određen je dinamički modul elastičnosti E_{dyn} , na osnovu korišćenja izraza [14]:

$$E_{dyn} = V_p^2 \rho \{ (1 + \mu_{dyn}) (1 - 2 \mu_{dyn}) / 1 - \mu_{dyn} \} \quad (1)$$

Gde je:

V_p – brzina longitudinalnih elastičnih talasa (m/s)

V_s – brzina transverzalnih elastičnih talasa (m/s)

μ_{dyn} - Poasonov koeficijent

γ - zapreminska težina (kN/m^3)

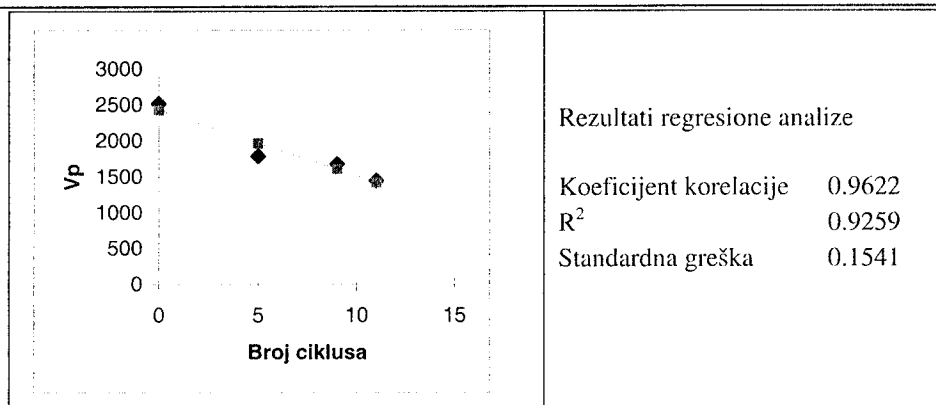
$$\rho = \gamma / a \quad (2)$$

$$\alpha = V_p / V_s \quad (3)$$

$$\mu_{dyn} = (2\alpha^2 - 1) / (2\alpha^2 - 2) \quad (4)$$

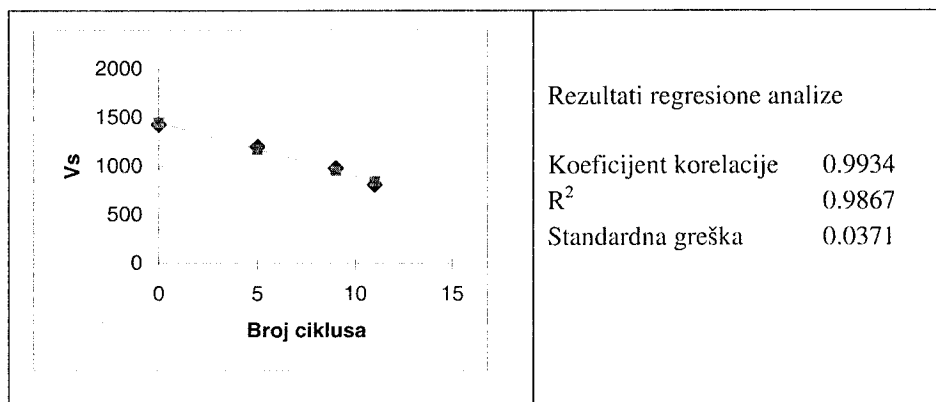
3. REZULTATI I DISKUSIJA

Na osnovu izvršenih merenja pretstavljenih u prethodnom poglavlju, izračunate su brzine talasa, i pretstavljene u funkciji broja ciklusa ispitivanja uzorka. Dobijeni rezultati su pretstavljene na slikama 2 i 3.



Slika 2 - Brzina longitudinalnih talasa (V_p) u funkciji broja ciklusa

Figure 2 - Ultrasonic velocity (V_p) of longitudinal waves versus number of cycles

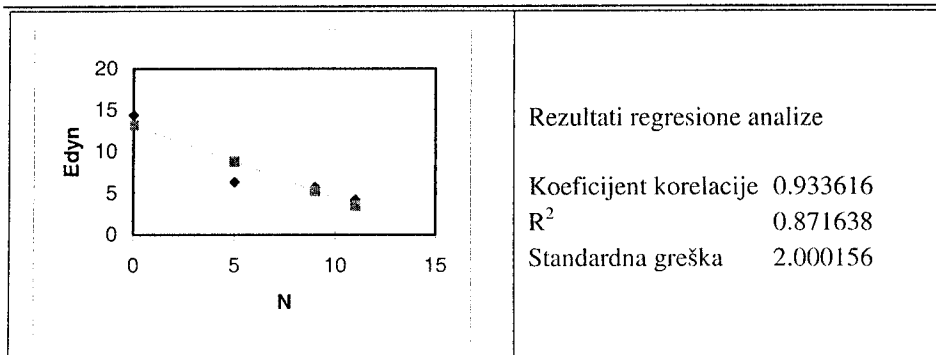


Slika 3 - Brzina transversalnih talasa (V_s) u funkciji broja ciklusa

Figure 3 - Ultrasonic velocity (V_s) of transversal waves versus number of cycles

Visoke vrednosti koeficijenta korelacije upućuju na postojanje vrlo jake zavisnosti između određenih brzina talasa i broja ciklusa ispitivanja. Sa povećanjem broja ciklusa ispitivanja dolazi do smanjivanja vrednosti brzina. Ovo se može povezati sa nivom oštećenja u materijalu. Sa povećavanjem oštećenja uzorka dolazi do opadanja izmerenih brzina. Već samo merenje brzina talasa može biti upotrebjeno za određivanje nivoa oštećenja vatrostalnog uzorka.

Dinamički Jungov modul elastičnosti je određen na osnovu izraza (1). Dobijeni rezultati su predstavljeni u funkciji izrežnog broja ciklusa, na slici 4.



Slika 4 - Dinamički Jungov modul elastičnosti (GPa) u funkciji broja ciklusa
 Figure 4 - Dynamic Young modulus (GPa) versus number of cycles

Na osnovu rezultata sa slike 4. takođe se zapaža korelacija dinamičkog Jungovog modula elastičnosti sa brojem ciklusa, samo je koeficijent korelacije niži nego u prethodnim slučajevima.

Na osnovu proračunatih vrednosti brzina talasa u uzorku i znajući vrednost pritiska čvrstoće materijala pre izlaganja termalnom šoku i na osnovu jednačine [4].

$$\sigma = \sigma_o (V_L / V_{L0})^n \quad (5)$$

gde je:

σ - pritisna čvrstoća

σ_o - pritisna čvrstoća pre izlaganja termošoku

V_L - brzina talasa (longitudinalnih ili transvezalnih) u uzorku

n - konstanta materijala uzeta da je 0,488 [4]

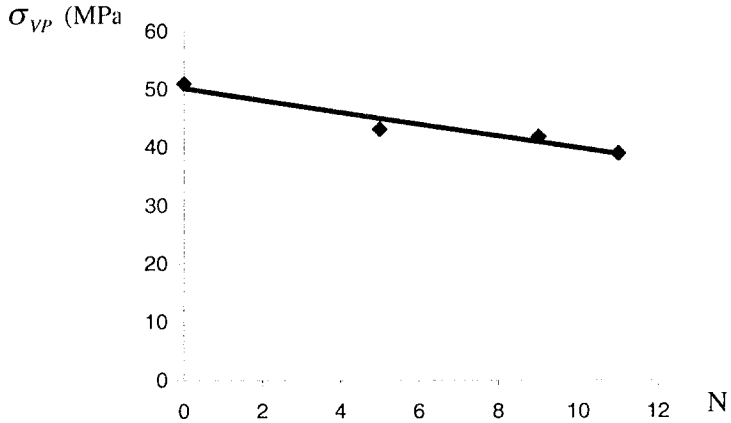
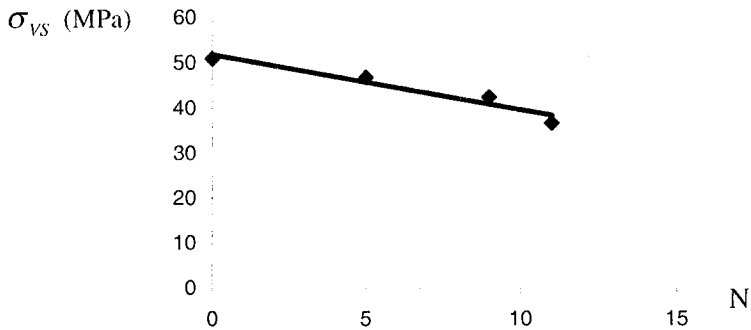
Izračunate su vrednosti pritiska čvrstoće u oba slučaja (sa longitudinalnim i transvezalnim brzinama) i prikazane na slikama 5 i 6.

Sa slika 5. i 6. može se uočiti jaka linearna zavisnost promene pritiska čvrstoće sa brojem ciklusa što pokazuju i rezultati linearne regresione analize prikazane u tabeli 2.

Tabela 2 - Rezultati linearne regresione analize zavisnost pritiska čvrstoće σ_{vp} i σ_{vs} od broja ciklusa

Table 2 - Results of the linear regression analysis of dependences compressive strength versus σ_{vp} i σ_{vs} number of cycles

Poređenje σ sa brojem ciklusa	Koeficijent korelacije R	R ²	Standardna greška aproksimacije
σ_{vp} - N	0,968039	0,937099	1,491689
σ_{vs} - N	0,966765	0,934635	1,520619

Slika 5 - Zavisnost σ_{VP} - NFig.5 - Dependence σ_{VP} - NSlika 6 - Zavisnost σ_{VS} - NFig.6 - Dependence σ_{VS} - N

4. ZAKLJUČAK

Primena i izdržljivost vatrostalnog materijala u uslovima eksploatacija se često procenjuje na osnovu njihove termostabilnosti. U okviru ovog rada promene u ponašanju vatrostalnog materijala izloženog termošoku su praćene upotrebom ultrasonične metode. Prednosti korišćenja ove metode su:

- metoda je bez razaranja uzorka,
- brzina metode je takva da skoro trenutno daje potrebne parametre,

- uređaj koji se koristi za merenje je lak, male težine, prenosiv, i može se koristiti van laboratorije.

Rezultati dobijeni u ovom radu su ukazali da je moguće povezivanja većeg broja parametara sa nivoom oštećenja u uzorku, do koga dolazi prilikom ispitivanja termošoka. Na osnovu podataka do kojih smo dosli, a koji su prezentovani u prethodnom poglavlju, može se zaključiti:

- Brzina longitudinalnih i transverzalnih talasa je obrnuto proporcionala broju ciklusa. Sa povećavanjem broja ciklusa naglog hladjenja uzoraka, dolazi do smanjenja izmerenih brzina (V_p i V_s).
- Izračunate vrednosti Jungovog modula elastičnosti određene na osnovu dinamičke metode (ultrazvučne) se mogu na zadovoljavajući način povezati sa brojem ciklusa naglog hladjenja. Sa povećanjem broja ciklusa dolazi do smanjenja dinamičkog Jungovog modula elastičnosti,
- Na osnovu određenih brzina talasa moguće je odrediti pad čvrstoće u materijalu izazvan termošokom. Dobijeni rezultati pokazuju jaku korelaciju između smanjenja čvrstoće i broja ciklusa naglog hladjenja.

Ovakvi zaključci upućuju na to da bi korišćenje ultrazvučne metode prilikom razmatranja i određivanja termostabilnosti vatrostalnih materijala značajno doprinela praćenju nivoa oštećenja do koga dolazi tokom ispitivanja. Takođe, ova razmatranja bi se mogla uključiti u postojeće metode, kao i razvoj novih metoda predviđanja termostabilnosti vatrostalnih materijala.

LITERATURA

- [1] Coppack, " A Method for Thermal Cycling of Refractories and an Appraisal of its Effect by a Non-Destructive Technique" , Trans. J.Brit. Ceram.Soc. 80 (1980) /2/ 43-46
- [2] F. Aly, C. E. Semmler, " Prediction of Refractory Strength Using Non Destructive Sonic Measurements", Am. Ceram.Soc.Bull. 64 (1985) /12/ 1555-58
- [3] C. E. Semler, " Nondestructive ultrasonic Evaluation of Refractories " Interceram, No 5 (1981) 485-488
- [4] S. K .Niyogi, A. C. Das, " Prediction of the Thermal Shock Behaviour of Castable Refractories by Sonic Measurements" Interceram, Vol 43, No 6, (1994), 453-457
- [5] 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
- [6] 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

- [7] T. D. Volkov-Husović, R. M. Jančić, Z. V. Popović, " Damage Resistance Parameters and Critical Flaw Size of the Alumina Based Refractories", *Interceram*, Vol 49, No 4, (2000), s 222-225
- [8] T. Volkov-Husović, R. M. Jančić, " Thermal Shock Behavior of Alumina Based Refractories: Comparison between Damage Resistance Parameters and Water Quench test", *Industrial Ceramics*, Vol 20, No 3, (2000) s 94-97
- [9] T. D. Volkov-Husović, R. M. Jančić, V. Radojević. Z. Popović, " Prediction of the thermal shock behavior of alumina based refractories: temperature difference, damage resistance parameters and water quench test " *EUROMAT 2001*, Rimini, Italy, 10-14 June 2001, Abstracts and Papers CD p 105
- [10] T. D. Volkov-Husović, "Termostabilnost vatrostalnih materijala na bazi ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$) : " ΔT " parametri otpornosti na termošok i standardna metoda vodenog hladjenja", *Metalurgija*, Vol.6, No. 2 (2000) s.125-135
- [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 odredjivanje termostabilnosti vatrostalnog materijala na bazi Al_2O_3 ", *Metalurgija*, Vol7, No 3. (2001) 191-199
- [13] T. D. Volkov-Husovic, R. M. Jančić, " Calculation of the heat transfer coefficient during the thermal stability testing of the alumina based refractories", *Journal of Metallurgy*, Vol 7, No 4. (2001)275-282
- [14] Laboratorijsko odredjivanje brzine impulsa i ultrazvučnih elastičnih konstanta sfera (JUS. D. B8. 121.)